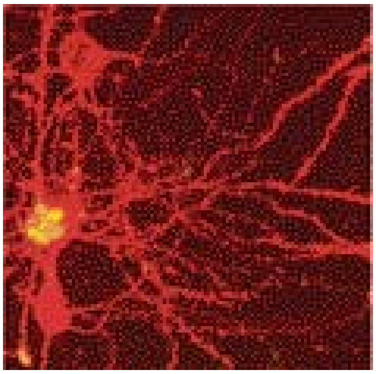
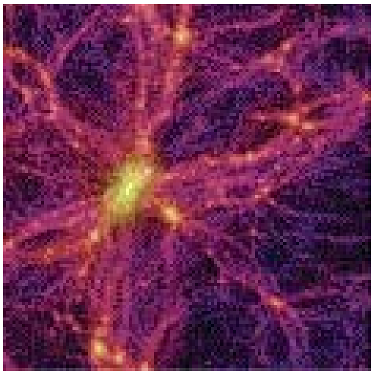
הקוסמוס



תאי המוח. מארק מילר, אוניברסיטת ברנדייס



הדמיית היקום. virgo consortium

תמונה אחת (מימין) היא גודל מיקרוסקופי. האחרת, מרחב של ביליוני שנות אור. הראשונה מראה תאי עצב (נוירונים) במוח של עכבר. השנייה מדמה באמצעות סימולציית מחשב את מראה היקום שלנו. ביחד אנו רואים לפתע את הדמיון המדהים בין כל תבניות החומר, הקירבה והאחדות בין תופעות טבע שונות ומרוחקות. מהתא הבודד אל מצבור הגלקסיות: אותם מרכיבי חומר, אותו מבנה, אותם קשרים – יקום אחד. התמונה מימין צולמה על-ידי מארק מילר מאוניברסיטת ברנדייס, שעוסק במחקר הקשרים בין תאי העצב במוח. במוח יש כעשרה מיליון תאי עצב. בצילום קולטים את הפעילות החשמלית של התאים והסינפסות. בתמונה שלושה תאי עצב (משמאל), שניים אדומים ואחד צהוב, ומערך הקשרים ביניהם. התמונה משמאל צולמה על-ידי קבוצת חוקרים אסטרופיזיקאים, שביצעו הדמיית מחשב המתארת את התפתחות היקום. בתמונה רואים התקבצות עתידית של גלקסיות (צהוב בהיר) הקרובות אלינו, ושסביבן מצבורי כוכבים. הצילומים הללו מבטאים את רוח ונושאי הגיליון שלפניכם: ממחקר תאי גזע עובריים, תאי הבסיס הראשוניים של היצור החי, עד לתחזית על עתיד היקום בעוד מיליארדי שנים. עולם מורכב ואינסופי, שכמו אלברט אינשטיין, טובי המדענים ממשיכים לחפש את אחדותו הבסיסית

(רעיון ברשת האינטרנט: דייוויד קונסטנטין)

יקום של כוכבים בגוף בתי / אסתר אטינגר

יְקוּם שֶׁל כּוֹכָבִים בְּגוּף בִּתִּי.
בִּתִּי הַיָּפָה שׁוֹכֶבֶת אֲסוּרָה בִּרְצוּעוֹת חוּמְלוֹת
אַפִּרַקְדָּן עַל מִטַּת מַסָּע.
יְקוּם שָׁלֵם שֶׁל כּוֹכָבִים נִפְרָשׂ עַל הַמָּסָךְ.
רִבּוֹא נְקוּדוֹת מְפוּזָּרוֹת
מְאִירוֹת אֶת הַצָּג הֶחָשׁוּךְ הַבּוֹלֵעַ קַרְנַיִם
עֲלוּמוֹת וּמְיַלֵּד אֵיבָרִים חֲסוּיִים
עִם הַדּוּבָּה הַגְּדוֹלָה וְהַדּוּבָּה הַקְּטַנָּה,
מִסְתַּדְּרוֹת בְּסֵדֶר מוּפְלָא, נֶעֱלָם מִמֶּנִּי.
צִפְצוּף נִשְׁמָע וּבִתִּי עַל הַמִּטָּה
נוֹסַעַת, עוֹד קֶטַע מָסָךְ נֶחְשָׂף
יְקוּם כּוֹכָבִים חָדָשׁ מֵאִיר, נוֹצֵץ
אֶבְרֵי הַגּוּף מְקִימִים גָּלַקְסְיוֹת וְעוֹלָמִים.

תָּאִים תָּאִים טוֹבִים תִּהְיוּ, תָּאִירוּ
בְּסֵדֶר נָכוֹן בַּאֲפֵלַת הָגּוּף,
בְּזֹהַר שֶׁמִּן הָעוֹלָם הַזֶּה

אודיסאה

| מסע בין רעיונות |

מערכת:
עורך ראשי: שמואל שם-טוב
עורכות אחראיות: אילה מילר, אורית סוליציאנו
ועדה מיעצת: עידן שגב, עילם גרוס אורלי שנקר
עריכה לשונית והגהות: מירב הלפרין, אילה לוין
תרגום: עמרי אשר, עמוס כרמל, כרמית גיא
עריכה גרפית ועיצוב: סטודיו קפלן/פרנקו
www.kfdesign.co.il

מאיירים: בתיה קולטון, איה בן רון
צלמים: ארנון תוסיה-כהן, יאן טיכי, ניר הוד

איור שער: בתיה קולטון
תרגום ציטוט בשער: עמנואל לוטם

מפיקה ומנהלת הפצה: איריס חייט
דפוס: דפוס אלי מאיר

מנהל פרסום ומודעות:
מוזה – פלטפורמת שיווק אקטיבית
מנהל מסחרי: אופיר שאומן
טלפון למודעות: 03-6226226
ofir@my-muzza.co.il

כתובת לפניות:
ת"ד 15055 רחובות 76150
odyssey@odyssey.org.il

הנהלה:
יו"ר: אילה מילר, יצחק אברבאנל
אורית סוליציאנו
מנכ"ל: שמואל שם-טוב

מוציאים לאור:
"אודיסאה – מסע בין רעיונות"
מיסודם של: חברת טבע,
האוניברסיטה העברית ירושלים

© כל הזכויות שמורות.
תוכן המודעות באחריות המפרסמים.

רוצים לעשות מנוי?
052-9993111, 03-9411621
www.odyssey.org.il

טבע תעשיות פרמצבטיות בע"מ

האוניברסיטה העברית בירושלים
The Hebrew University of Jerusalem

400 שנה לטלסקופ הראשון (ונציה, 1609)

לכבודו של גליליאו גליליי, מאנשי המדע החשובים והמשפיעים ביותר, הוכרזה 2009 כשנת האסטרונומיה. ברחבי העולם מציינים את יום השנה להמצאת הטלסקופ הראשון שבנה גליליאו, מכשיר הגדלה פשוט ששכלולו מאפשר לנו היום הצצה אל תחילת היקום. האסטרונומיה עשתה בשנים האחרונות כברת דרך עצומה. טלסקופי החלל סיפקו נתוני תצפית מדהימים, והאסטרופיזיקאים מסוגלים להציע תיאוריה כוללת על מהות היקום, הרכבו ועתידו. הגיליון השלישי של "אודיסאה" הוא מסע היוצא מהתא החי ומסתיים בגלקסיות רחוקות, רבי-יקומים ופיזיקת המיתרים. המסע הזה מתרחש באמצעות אחת היכולות המופלאות והבלעדיות של האדם – היכולת לדמיין, לבנות תיאוריה, לחבר תחומים מרוחקים ולהבין. שני גדולי המדע שבלטו בכוח הדמיון והחיבור שלהם, גליליאו גליליי ואלברט אינשטיין, הם גיבורי גיליון זה

"אודיסיאה - מסע בין רעיונות"

כתב עת העוסק במחשבות, רעיונות, דילמות וויכוחים המתקיימים בחזית העשייה המדעית והפילוסופית העכשווית. כתב העת מכוון ליצירת חיבור בין מדע לחברה ובין רעיונות לתוצאותיהם ולמשמעותם. חברת "טבע" והאוניברסיטה העברית בירושלים מוציאות לאור את "אודיסאה" כחלק מפעילותן לקידום המדע והתרבות בישראל

ארכימדס 06 | היפותזה 07 | פוזיטיביזם 07 | ז'ול ורן 09 | אינשטיין 10 | תאלס 13 | מרחב-זמן 14 | קופרניקוס 19 | תלמי 19 | אפיצקל 19 | פרנק דרייק 21 | טלסקופ 23 | ירח 24 | סופרנובה 32 | גלקסיה 33 | אנדרומדה 34 | אנרגיה אפלה 37 | יקום תופח 39 | גיאומטריה 41 | זמן 42 | גנים 45 | סכיזופרניה 47 | חמישיית דיון 48 | אוטיזם 55 | שפה 56 | קוונטים 62 | דו-משמעות 63 | נוירונים 64 | קאנט 65 | פירמידות 68 | שעון 69 | אובמה 73 | מותליציה 76 | תאי גזע 77 | סרטן 079 | מפלצות 80 | אנג'לינה ג'ולי 82 | עולמות מקבילים 83 | תורת המיתרים 84 |

תוכן עניינים

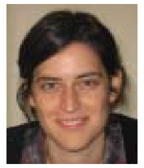
מדורים

06 **פתח דבר – לפקוח עיניים ולהתחיל לחלום /** שמואל שם-טוב
18 **מחפשים בית חדש /** דודי גולדמן
42 **תמונת אמן – "טווילה" /** מיכל קציר, ד"ר אורלי שנקר
54 **לחשוב מילים לדבר תמונות /** רותם חרמון
68 **ניפגש בעוד עשרת-אלפים שנה /** רן לוי
80 **לא לפחד כלל /** רן אדליסט
83 **ביקורת ספר /** פרופ' עילם גרוס

פרופ' חיים סידר

72 להתחיל מבראשית

פרופסור לביוכימיה של התא וגנטיקה של האדם בבית-הספר לרפואה של האוניברסיטה העברית בירושלים. זוכה פרס ישראל בחקר הביולוגיה ב-1999, זוכה פרס אמ"ת וזוכה פרס וולף. עוסק במחקר מנגנונים אפיגנטיים בתא החי



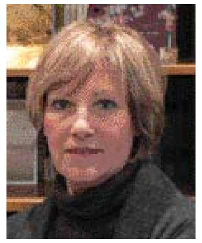
ד"ר רזי גרינפילד
דוקטורנטית במחלקה לביוכימיה וגנטיקה של האדם בבית-הספר לרפואה של האוניברסיטה העברית. חוקרת מנגנונים אפיגנטיים בהנחיית פרופ' חיים סידר

פרופ' חנוך גוטפרוינד

10 החיפוש אחרי תיאוריה שתסביר את הכל

פרופסור אמריטוס לפיזיקה באוניברסיטה העברית. עסק במחקר בפיזיקה של מצב מוצק ובממשק בין פיזיקה ומדעי המוח. ממקימי המרכז לחישוביות עצבית באוניברסיטה. לשעבר רקטור ונשיא האוניברסיטה העברית בירושלים. מרכז מטעם האוניברסיטה את הפעילות הקשורה באלברט אינשטיין ברחבי העולם

פרופ' רבקה פלדחי



22 להסתכל, לראות, להבין

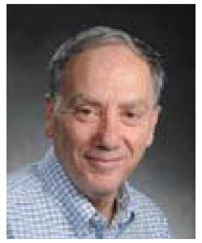
פרופסור להיסטוריה של המדעים והרעיונות באוניברסיטת תל-אביב. בשנים 1997-2003 כיהנה כראש מכון כהן להיסטוריה ופילוסופיה של המדעים והרעיונות. עוסקת בהיסטוריה אינטלקטואלית של המאות ה-16-17. פרסמה ספרים ומאמרים רבים העוסקים בגליליאו גליליי, אישיותו, רעיונותיו ועבודתו המדעית

פרופ' אברהם לייב

30 והיה "באחרית הימים"

פרופסור לאסטרונומיה באוניברסיטת הרווארד וראש המכון לתיאוריה ומחשוב במרכז הרווארד-סמיתסוניאן לאסטרופיזיקה. חוקר בעל שם עולמי בקוסמולוגיה תיאורטית, השוהה מדי שנה כחודש כפרופסור אורח במכון ויצמן

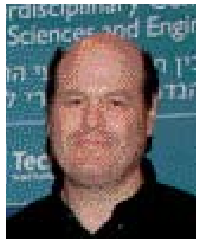
פרופ' מריו ליביו



36 שודקים באפלה

אסטרופיזיקאי בכיר במכון למדע טלסקופ החלל ומנהל התוכנית המדעית של טלסקופ החלל "האבל". פרסם יותר מ-400 מאמרים מדעיים בטווח רחב של נושאים באסטרופיזיקה וארבעה ספרי מדע פופולרי, שניים מהם תורגמו לעברית – "חיתוך הזהב: קורותיו של מספר מופלא" ו"שפת הסימטריה: המשוואה שלא נמצא לה פתרון"

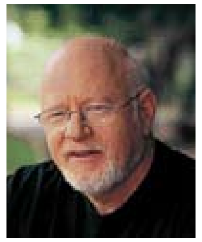
פרופ' ארז בראון



44 גנים. בהחלט לא הכל בחיים

פרופסור לפיזיקה, חוקר ומרצה בפקולטה לפיזיקה וחבר במרכז לחקר רשתות ביולוגיות בטכניון. עוסק בביופיזיקה ניסויית, עם דגש על הבנת הביולוגיה כמערכת אינטגרטיבית. חוקר את תהליכי ההסתגלות של אוכלוסיות תאים לאתגרים חדשים, את האבולוציה של מערכות הבקרה הגנטיות ואת הפוטנציאל האבולוציוני של התא החי

פרופ' רפאל מלאך



60 מפוטונים לפנטזיות

פרופסור במחלקה לנוירוביולוגיה במכון ויצמן למדע ומחזיק הקתדרה לחקר המוח על שם מוריס וברברה לוינסון. תחום העניין שלו הוא חקר מנגנוני ראייה וחישה אחרים במוח האדם והקשר שלהם לתפיסה ולמודעות

שמואל שם טוב / צילומים: ארנון תוסיה־כהן

לפקוח עיניים ולהתחיל לחלום

היכולת לדמיין היא תכונה אנושית ייחודית, שהתפתחה במהלך האבולוציה ובזכותה נוצרו המדע והאמנות. אם צריך להציע מרכיב אחד שבלעדיו לא תיתכן יצירתיות וחדשנות, יכולת הדמיון היא כנראה המרכיב הזה

"ללא כותרת" מתוך הסדרה התפרצות

"מה שמייחד את המוחות המקוריים באמת אינו עובדת היותם הראשונים לראות דבר־מה חדש, אלא העובדה שאת הדברים הישנים, הדברים המוכרים זה מכבר, הדברים שכל אחד רואה ומתחמק מלראות, הם רואים כאילו היו חדשים"

(פרידריך ניטשה, "אנושי, אנושי מדי")

"הניסיון הוכיח, והפילוסופיה מוכיחה תמיד, כי חלק גדול מן האמת עולה דווקא ממה שנראה, במבט ראשון, כאילו אינו שייך לעניין"

(אדגר אלן פו)

■ המדען, כך למדנו בבית הספר, מתקדם צעד אחר צעד. הוא נתקל בבעיה, לעיתים פשוטה ולרוב מורכבת, ומתיישב לחקור אותה ולחשוב עליה. לפתע צצה במוחו היפותזה; פתרון אפשרי לבעיה. כדי לבחון את ההיפותזה, הוא נכנס למעבדה, או יוצא לתצפית בטבע, עורך ניסוי ובודק אם צדק או טעה.

כמה אהבנו את הסיפור על ארכימדס, שהתלבט בבעיה הקשורה לכתר הזהב של המלך ומצא את הפתרון לאחר שנכנס לאמבטיה. אאוריקה! (מצאתי) צעק ארכימדס, כשראה את המים הגולשים כתוצאה מנפח גופו. המראה הוליד את ההיפותזה: כמות המים הנדחית שווה לנפח הגוף. מכאן ועד לעריכה של סדרת ניסויים, ולניסוח חוק טבע כללי הקובע את כוח העילוי הפועל על גופים שונים – היתה הדרך קצרה.

מניין צצות ההשערות? מהו מקור ההשראה של אנשי מדע, ממציאים, אמנים ויוצרים? תהליך היצירה – הפקת דבר־מה חדש, שלא התקיים בצורה כלשהי לפני כן – נשאר מעורפל ומסתורי למדי. אינספור אנשים ניסו לפענח את נוסחת היצירתיות, לחשוף את תהליך הגילוי ולהבין את המתרחש באותו רגע מופלא שבו נולדת היפותזה ראויה, אך עד עצם היום הזה לא ברור לנו איך מתגלה או מתקבלת תיאוריה חדשה. אף־על־פי־כן נדמה לנו, שאם רק נצליח לבנות מודל של תהליך יצירתי, רק נשכיל לזהות את מקור ההיפותזות – נאחז בידינו את המפתח לשערי גן העדן.

צ'ארלס פירס, אחד הפילוסופים המבריקים באמריקה של המאה ה־19, היטיב להציג את המסתורין הזה: **"אנו חייבים לעצמנו תשובה כיצד ייתכן שגאונים מחוננים הציעו ניחושים מועטים כל־כך בטרם הגיעו לניחוש המתאר נכונה את חוקי הטבע"**, כתב. **"איך קורה שאדם מצליח בכלל לייצר תיאוריה נכונה, בשעה שהסיכוי, שמכל אינספור התיאוריות האפשריות תקפוץ אל מוחו דווקא תיאוריה אמיתית אחת, הוא אפסי ממש"**.

האם לא די שנתבונן סביבנו, כפי שעשה ארכימדס באמבטיה, נקלוט בחושינו את המתרחש, נעבד את הנתונים ונסיק מהם תיאוריה טובה? מסתבר שלא. גם ההחלטה על מה לצפות, לאילו נתונים להתייחס וממה להתעלם – דורשת היפותזה מוקדמת. או כפי שאמר פילוסוף המדע קארל המפל: **"אין כללים שבאמצעותם ניתן לגזור ולהסיק מן המציאות שמסביבנו היפותזות או תיאוריות באופן מכני. המעבר מן הנתונים אל התיאוריה דורש דמיון. היפותזות ותיאוריות אינן נגזרות מעובדות. הן מומצאות"**. אם כן, שוב נשאלת השאלה – איך "עולים" על תיאוריה נכונה? מהו תהליך הגילוי?

השאלה הפשוטה הזאת הטרידה דורות של פילוסופים, שכן היפותזה היא השערה חדשה; רעיון שלא היה קיים קודם בשום מקום. עד זמנו של קופרניקוס היו הכל בטוחים שכדור הארץ ניצב במרכז והשמש סובבת סביבו. לפתע הופיע נזיר פולני מוזר, שהציע תיאוריה חדשה: כדור הארץ, הוא טען, הוא שמסתובב במהירות גדולה סביב השמש.

תיאוריות שהציעו את האפשרות כי השמש עומדת במרכז אמנם הוצעו כבר ביוון העתיקה, אבל מעולם לא זכו לתמיכה או להכרה ממשית. התיאוריה ההליוצנטרית שלטה בעולם למעלה מ–1500 שנה

חושינו מספקים עדות הסותרת לחלוטין את ההיפותזה שלו – הלוא אנחנו רואים יום־יום כיצד השמש עולה במזרח ושוקעת במערב. אנו עומדים עמידה איתנה על אדמת כדור הארץ, ומעולם לא הרגשנו שום משב־רוח או תנועה סיבובית. מנין אפוא צץ הרעיון המטורף במוחו של קופרניקוס? ומדוע הוא היה משוכנע כל־כך באמיתותו?

הדמיון והיצירה

העברית המודרנית יצרה את המלה "השראה", הנובעת מן השורש ש.ר.ה, וקשורה בתפיסת השכינה. "שרתה עליו רוח האלוהים" נאמר על בלעם, שאלוהים הכניס דברים לפיו, וכך על הנביאים שנגלתה להם אמת בלתי צפויה. אלה הגיעו לגילוי באמצעות רוח האל, שירדה מן השמיים, התחברה אליהם והעבירה דרכם את הבשורה. מקור ההיפותזה הנבואית אינו מוטל, אם כן, בספק.

"תהליך היצירה - הפקת דבר־מה חדש, שלא התקיים בצורה כלשהי לפני כן - נשאר מעורפל ומסתורי למדי. אינספור אנשים ניסו לפענח את נוסחת היצירתיות, לחשוף את תהליך הגילוי ולהבין את המתרחש באותו רגע מופלא שבו נולדת היפותזה ראויה"

הדת היא מקור השראה חשוב בהיסטוריה של המדע. כוחם של סיפורי התנ"ך והאמונה הדתית חזקים עד כדי כך, שמרבית אנשי המדע הדתיים השליכו מתיאורי התנ"ך על רעיונותיהם המדעיים, לעיתים קרובות בהצלחה. איש המדע הבריטי מייקל פרדיי, שבגילוי מהפכני ודרמטי הצליח לחבר את תופעת המגנטיות עם החשמל ופתח את הדרך להבנת מושג האנרגיה, הגיע להיפותזה הבסיסית שלו מתוך אמונתו הדתית. תלמידי המדע באותה תקופה למדו בעיקר על כוחות משיכה ודחיפה, כוחות הפועלים (ומשורטטים) בקווים ישרים. פרדיי, לעומתם, היה חבר קהילה דתית נוצרית־סנדמניאנית, שהאמינה בכוחו ובחשיבותו של המעגל. דפוס הפעולה האידיאלי של חברי הקהילה היה מעגלי, והם עסקו בשאלות פילוסופיות וחברתיות הקשורות לנושא. פרדיי בנה תיאוריה מעגלית, המסבירה את התנהגות המגנט, בניגוד מוחלט לחוקרים האחרים, שחשבו כאמור במונחים קוויים. התיאוריה שלו, כך התברר, היתה נכונה, וניסוייו אף הוכיחו כי החשמל והמגנט שייכים לתחום תופעות אחד.

האסטרונום יוהנס קפלר העלה את ההשערה, כי גופים מושכים זה את זה. ככל הידוע, הגיע אליו הרעיון מכתביו של איש כנסייה מן המאה החמישית, אשר עסק באהבת האלוהים הממלאת את כל החומר ביקום. האל פועל בעולם ממש כשם שאוהבים מתחברים ומתאחדים זה עם זה ואינם רוצים להיפרד, כתב האיש. אי לכך, כל גוף ביקום נמשך אל גוף אחר.

הפוזיטיביסטים טוענים כי מקור ההשערות הוא ניסיון החושים – קליטת מידע מן העולם החיצון והסקת מסקנות לוגיות ותיאוריה בדרך האינדוקציה (מן הפרט אל הכלל). אחרים >>

סבורים כי ההשערות הן תוצר של פעילות המוח וההכרה, וכי אנו בונים במוחנו מודל תיאורטי כללי, ואחר־כך מנסים להתאימו לעולם, להשליך אותו עליו ולהסיק ממנו מסקנות בדרך של דדוקציה. יש גם פילוסופים שמאמינים באינטואיציה לא מוסברת, בהארה מיסטית ואפילו סתם בניחושים.

אולם עקרונות מסוימים של היצירתיות מקובלים על פסיכולוגים ועל הפילוסופים של המדע כאחד. המרכזי שבהם הוא ה**דמיון**. באמנות, במוזיקה, במדע – בכל תחום שדרושים בו רעיונות יצירתיים חדשים – משחק הדמיון האנושי תפקיד מכריע. חלק גדול מן התיאוריות של היצירתיות נשען על ההנחה כי מעשה היצירה הבסיסי הוא חיבור בין שני תחומים שאיש לא העלה בדעתו לחברם קודם. היכולת לערוך אנלוגיה בין תחומים, למצוא דפוסי פעולה דומים, לראות קשר בין מגנט לבין חשמל במקום שאיש לא ראה – זוהי הפעולה היצירתית הבסיסית. במובן זה, הפעולה היצירתית איננה יצירה של יש מאין. היא דומה יותר לחיבור מבריק של אידיאות או של נתונים, שהתקיימו באזורים נפרדים, רחוקים זה מזה, ולפתע הצטרפו והיו למערכת אחת.

בימינו, מדברים בכל סדנת ניהול על יצירתיות במושגים של יציאה מתוך הקופסה. אנשים יצירתיים אמורים להיות מורדים מטבעם, כאלה שאינם זקוקים למערכת כללים ברורה כדי לתפקד. היכולת לחשוב "מחוץ לקופסה" קשורה קשר הדוק ליכולת לדמיין ולייצר אסוציאציות. אמת, היציאה מן הקופסה היא אמנם תנאי חשוב לכל רעיון חדש, אך היא איננה תנאי מספיק. כדי לייצר אסוציאציות דרושה, בין השאר, גם הבנת תחומים שונים זה מזה: מוזיקה ומתמטיקה, ביולוגיה וכלכלה, נוירולוגיה וחשמל, מדע ואמנות. ידע רב־תחומי הוא מפתח חשוב לחדשנות ויצירתיות. באקדמיה המודרנית, שבה מדענים מסתגרים בתחום ההולך ונעשה צר, לעיתים מחשש שיואשמו בשטחיות, מתמעטים הסיכויים לתגליות מרעישות.

הפתרון טמון בשיתוף פעולה בין מדענים ובין דיסיפלינות: בצוותי עבודה משותפים, במידע פתוח ברשת וברב־תחומיות של תחומי מחקר. המדען צריך לחזור אל הלחם והחמאה: היכולת לעשות אינטגרציה, לחבר בין מערכות ותחומים ולחשוף ולדמיין דפוסים דומים.

יופי ושלמות

מרגע שצץ ועלה רעיון חדש, נוצר הצורך להחליט על־פי אילו אמת־מידה יתקבל הרעיון כנכון ואמיתי, וישכנע את הקהילה המדעית כולה בתקפותו. ההיסטוריה המדעית רצופה בתיאוריות טובות שנדחו, בתיאוריות שגויות שהתקבלו, ואפילו בתיאוריות שהתקבלו ללא כל הוכחה, פשוט מפני שאיש לא יכול היה לעמוד בפני הכוח האצור בהן.

איך, אם כן, מפתחים אמת מידה ראויה של סינון? פילוסוף המדע מיכאל פולני מציע לנו קריטריון להכרה בתקפותה של תיאוריה מדעית. תיאוריה טובה, הוא טוען, היא תיאוריה קוהרנטית. בני אדם מסוגלים, לדבריו, לחבר חלקיקי ידע ותחושות לכלל תבנית **קוהרנטית**. רגע האיחוד והחיבור הוא רגע הגילוי, ולנוכח תחושת השלמות הנובעת ממנו – אנו מבינים כי בידינו מידע חדש ואמיתי.

אינשטיין המשיך, כידוע, עד סוף ימיו לחפש אחר התיאוריה המאוחדת שבה האמין. החיפושים נמשכים ופיזיקאים רבים מאמינים כי תיאוריה כזאת הכרחית וכי ניתן להגיע אליה. מאמרו של חנוך גוטפרינד עוסק בסוגיה זו בהמשך

כל מדען מחפש אחר הקשר בין תחושותיו והכרתו לבין המציאות החיצונית, מאמין פולני, ורק תיאוריה שתצליח לאחד באופן קוהרנטי את התחושות הפנימיות והחיצוניות תתקבל, אם כן, כנכונה. הדבר דומה לקריאת ספר טוב.

מריו ליביו, שכתב את הספר על הסימטריה, מפרסם בגיליון זה מאמר על האנרגיה האפלה ביקום – אחת התופעות המפליאות והחשובות שהתגלו לאחרונה

קשה לנו לפרק את מרכיבי ה"טוב" שבספר לחלקים ולהסביר את השיטה המולידה כתיבה מעולה וללמדה – אבל אנחנו בהחלט יכולים לקבוע שספר הוא יצירת מופת.

אפלטון טוען כי הידיעה טמונה בתוכנו תמיד, ובתהליך הלימוד אנו מצליחים להוציאה אל האור. רגע הגילוי אינו, אם כן, אלא הרגע שבו השכלנו לחשוף דבר־מה שהיה נטוע בנו מלכתחילה. לפי פולני, הידע אינו מתגלה לנו באמצעות נתונים חיצוניים חדשים, אלא באמצעות תכונות אנושיות שבמרכזן היכולת לייצר תבנית קוהרנטית מחלקים הנראים נפרדים זה מזה לכאורה.

התיאוריה המהפכנית ביותר בפיזיקה היא תיאוריית המיתרים, או תיאוריית ה־M, המתארת את מבנה היקום כמערכת של מיתרים עדינים. מגוון החלקיקים ביקום בנוי ופועל, לפי תיאוריה זו, כמו כלי מיתר מוזיקלי, שתפוקתו – הצלילים והסימפוניה המלאה – היא היקום. המטפורה המוזיקלית עתיקה כדברי ימי הפילוסופיה. באי היווני היפהפה סאמוס גילה פיתגורס את ההרמוניה של הצלילים. האוקטבות ההרמוניות, הוא נוכח לדעת, נשמעות כאשר מחלקים מיתר במספרים שלמים. הפיתגוראים ממשיכי דרכו האמינו באמונה שלמה, כי הטבע הוא מוזיקה וכי סדר הצלילים הוא הסדר שעל־פיו מתנהל הטבע ונעים הכוכבים במסלולם. מוזיקה ומתמטיקה, אוקטבות ומספרים שלמים הם, לפי אמונתם, בסיסי היקום, ובינם לבין עצמם אכן שורה הרמוניה מלאה. ה**הרמוניה** חייבת, משום כך, להיות הבסיס לתקפותה של כל היפותזה ושל כל תיאוריה על העולם, ועל אחת כמה וכמה לתפיסת המדע שהציע פיתגורס.

מדענים אחרים האמינו ב**סימטריה**, שפירושה ביוונית "אותה המידה" או "מידה שווה". תיאוריות רבות של מדע נובעות מן התפיסה כי הסימטריה היא המפתח להבנת הטבע. סימטריה מזוהה עם **יופי**, שגם הוא אחד ממושגי המפתח בהבנת מקור התיאוריות המדעיות. הסימטריה, אומר האסטרונום מריו ליביו, היא הכלי הראשון לחיבור בין מדע ואמנות, פסיכולוגיה ומתמטיקה.

"ללא כותרת" מתוך הסדרה התפרצות

בד־בבד עם הסימטריה, ההרמוניה, הקוהרנטיות והיופי, מוזכרים גם מושגים כמו שלמות, פשטות ואלגנטיות כסימנים מובהקים המעידים על אמיתותה של תיאוריה. תיאוריה טובה חייבת להיות פשוטה, וכוחה ביכולת להסביר נתונים רבים בכמה שפחות נוסחאות ופלפולים. "זה כל־כך יפה, שזה לא יכול להיות שגוי", אומרים מדענים כשהם נתקלים בתיאוריה משכנעת שעדיין לא הוכחה. אכן, דווקא יופי ופשטות עשויים להיות משכנעים יותר מתצפית או ניסוי, ואפילו מהוכחה מתמטית.

הספרות היא, משום כך, מקור בלתי נדלה להמצאות מקוריות ולאנלוגיות. ז'ול ורן, אדגר אלן פו, איזאק אסימוב הם דוגמאות לסופרים רבי דמיון והשראה, שפרסמו בספריהם תיאוריות מדעיות ורעיונות המבוססים על היפותזות שפשוט צצו במוחם. ורן כתב על עשרות המצאות, שבתקופתו היו עדיין רחוקות מהבשלה, ופו הציע כבר במאה ה־19 כמה רעיונות על מבנה היקום, שרק במהלך המאה ה־20 התגלו כנכונים. ככל הידוע, הוא היה הראשון שהעלה את ההשערה שהיקום סופי ומתפשט. אסימוב וחבריו השתמשו ברעיונות הטלפורטציה (העברת חפצים במרחב) והעולמות המקבילים, זמן רב לפני שרעיונות אלה היו לתיאוריות פיזיקליות לגיטימיות. סופרים, ציירים ומשוררים "מעופפים" הם לעיתים קרובות מדענים בכוח, והלוא גם מדענים יצירתיים הם, כמעט תמיד, חולמים בהקיץ.

מבלי שהצהיר זאת מראש מצא עצמו גיליון מספר 3 של "אודיסאה" עוסק בנושאים הקשורים ליצירתיות ודמיון. חנוך גוטפרינד שב ומשחזר את ניסיונו הכושל של אינשטיין לחפש תיאוריה מאוחדת, שתהיה הפעולה היצירתית האולטימטיבית: חיבור כל המערכות והתחומים למערכת כוללת ומובנת אחת שמסבירה את העולם. עילם גרוס כותב ביקורת על ספרו של מיציו קאקו העוסק בתורת המיתרים והעולמות המקבילים – אולי היצירה הדמיונית הגדולה ביותר של רוח האדם המודרני. ארז בראון, פיזיקאי וביולוג, מסביר למה אין מנוס מפענוח התא והתנהגותו באמצעות מחקר רב־תחומי המשלב דיסציפלינות רבות בתפיסה מערכתית. רפי מלאך מתאר איך המוח מייצר את הדימויים שלנו על העולם ומדוע הם מתאימים לעולם. המסע הנוכחי של "אודיסאה", כולו אפוא מסע של דמיון אנושי, רעיונות וחיבורים בין דיסציפלינות ותחומים.

על מושג אחד לא דיברנו כלל, והוא האמת. איזו תיאוריה אמיתית ואיזו שקרית? כיצד, אם בכלל, ניתן להפריד ביניהן? יעקוב ברונובסקי כתב: **"האמת שאליה מגיעה המחשבה המדעית איננה אמת אידיאלית נטולת שגיאות, אלא אמת שאנו יכולים לפעול על־פיה ללא חשש"**. מקורן של ההיפותזות הוא בדמיון האנושי, אך אנו יכולים לפעול על־פיהן בעולם המציאותי ללא כל חשש. זוהי גדולתו של המדע ■

shemtov2@017.net.il

שמואל שם טוב הוא איש תקשורת ועורך כתב העת "אודיסאה – מסע בין רעיונות"

חנוך גוטפרוינד

"תופעה כמו נפילת תפוח מעץ נראית שונה ומרוחקת מתנועת הירח סביב כדור הארץ. אם לא היתה לאייזק ניוטון תיאוריה של כבידה וניסוח מתמטי המתאר תנועה של גופים, הוא לא יכול היה להסיק ששתי התופעות נקבעות על–ידי אותה מערכת של מושגים ועקרונות"

החיפוש אחרי תיאוריה שתסביר את הכל

מדובר בחלום אנושי ישן ויומרני - לתת הסבר אחד לכל תופעות הטבע ולהעמידן על מספר חוקי פיזיקה פשוטים. אלברט אינשטיין האמין שהעולם מאורגן ומסודר, ושניתן לתפוס באמצעות שכלנו את העקרונות והחוקים שלפיהם הוא פועל. את כל חייו כמדען הוא הקדיש למציאת חוקים אלו. היו לו הצלחות עצומות, אבל הוא נכשל במשימה העיקרית – למצוא "תיאוריה שתאחד את הכל". היום נמשכים החיפושים ביתר שאת

"אני מונע על־ ידי הצורך שלי להכליל"

(אלברט אינשטיין במכתב לעמית, 1916).

"המטרה האמיתית של המחקר שלי היתה תמיד הפשטה והאחדה של הפיזיקה העיונית"

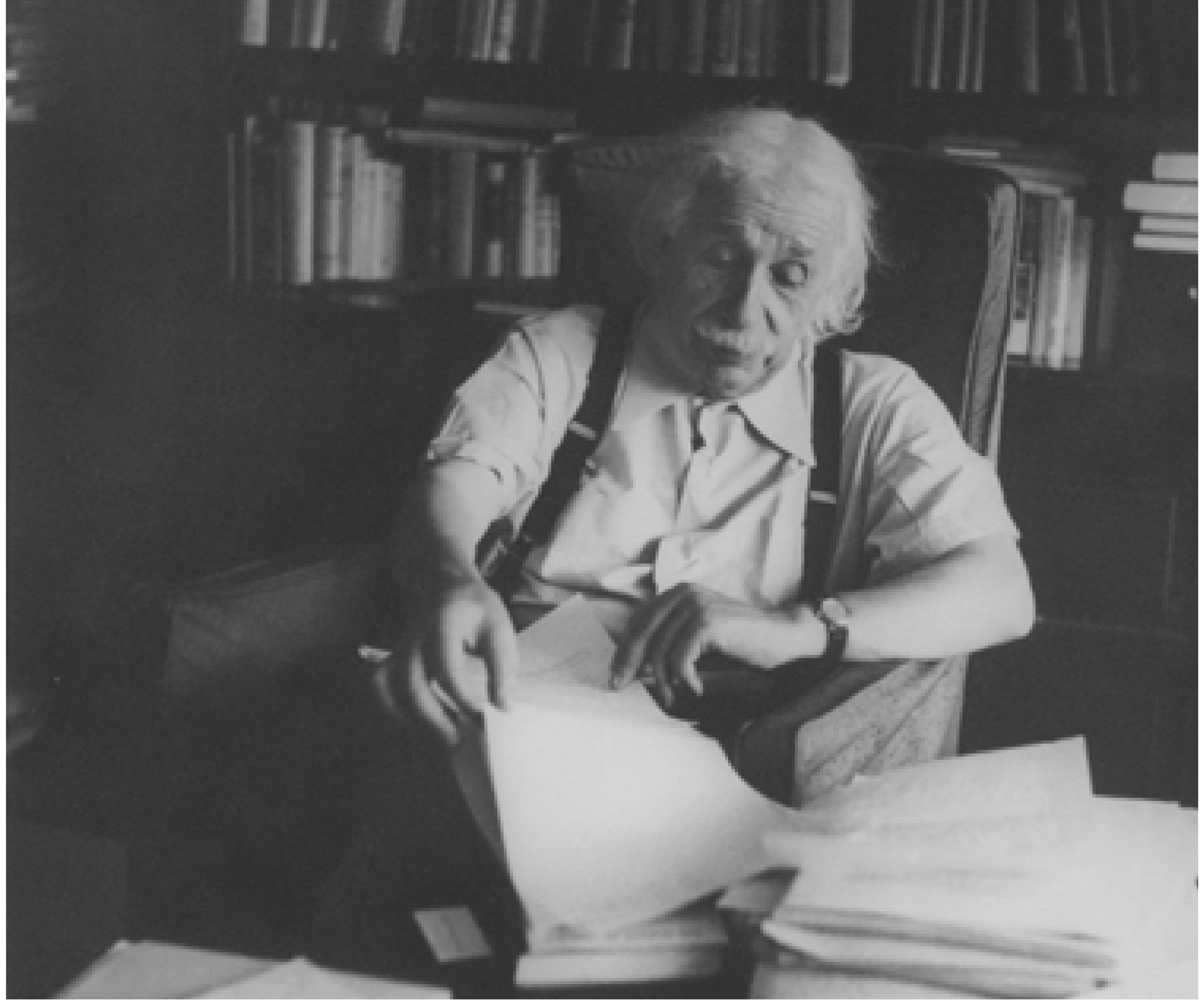
(אינשטיין, בשאלון שמילא עבור האקדמיה המלכותית למדעים, גרמניה, 1932).

■ הלורד ארנסט רטרפורד, מדען בריטי הידוע בעיקר בזכות מחקריו על מבנה האטום, אמר פעם: "**כל המדע הוא פיזיקה או איסוף בולים**". איסוף בולים שימש, לשיטתו, כמטפורה לתופעות שכל אחת מהן עומדת בפני עצמה, ללא מסגרת תיאורטית או מודל מתמטי שיאחדו אותן למכלול אחד. כך נראו בתחילת המאה ה–20 הזואולוגיה, הבוטניקה ותחומים אחרים במדעי הטבע.

הפיזיקה, לעומת זאת, הצטיינה תמיד ביכולתה לאחד תחומים, שנחשבו שונים לגמרי, למסגרת אחת של מושגים ולמערכת אחת של משוואות מתמטיות. הפיזיקאי ויליאם תומפסון (לורד קלווין), שפעל במאה ה–19

>>

אינשטיין 1905. השנה המופלאה
צילום: Lucien Chavan באדיבות ארכיון אלברט אינשטיין, האוניברסיטה העברית בירושלים



אינשטיין המבוגר בחדר עבודתו בפרינסטון. כל חייו המשיך לחפש תאוריה כוללת
צילום: הרמן לנדסהוף. באדיבות ארכיון אלברט אינשטיין, האוניברסיטה העברית בירושלים

ובתחילת המאה ה-20, אמר: **"איני חש שביעות רצון עד שאני מצליח לבנות מודל מתמטי של מושא החקירה שלי. אם אני מצליח לבנות מודל כזה, אני מבין. אחרת, אינני מבין"**. גם אלברט אינשטיין טען שהחיפוש אחרי תיאוריות מתקדמות ומכלילות יותר ויותר הוא ביטוי ל"תשוקה להבין". ההצלחה הגדולה ביותר של תיאוריה מדעית היא היכולת להדגים, שתופעה מסוימת מתיישבת עם משהו שכבר ידוע, או משהו שהוא, לפחות לכאורה, מובן מאליו.

תופעה כמו נפילת תפוח מעץ נראית שונה ומרוחקת מתנועת הירח סביב כדור הארץ. אם לא היתה לאייזק ניוטון תיאוריה של כבידה וניסוח מתמטי המתאר תנועה של גופים, הוא לא יכול היה להסיק ששתי התופעות נקבעות על-ידי אותה מערכת של מושגים ועקרונות. דוגמה יפה נוספת מהמאה ה-19 לאיחוד שכזה היא מערכת המשוואות של ג'יימס מקסוול, שתיארה במסגרת אחת תופעות חשמליות ומגנטיות וניבאה את קיום הגלים האלקטרומגנטיים. בכך היא איחדה במסגרת תיאורטית אחת שלושה תחומים שנדמו קודם לכן כשונים זה מזה – חשמל, מגנטיות ואופטיקה.

אינשטיין האמין באמונה שלמה, כי מכלול התופעות שאנו תופסים באמצעות החושים ניתן להבנה במערכת מאוחדת אחת של מושגים ועקרונות. **"המסתורין הנצחי של העולם הוא האפשרות להבין אותו... העובדה שהוא ניתן להבנה היא נס"**, אמר. להבין את העולם פירושו להבין את החוקים הבסיסיים המרכיבים את סך התופעות. אינשטיין מפרט זאת במספר מקומות לאורך חייו המדעיים. במאמר על "עקרונות המחקר" משנת 1918 הוא קובע מהי משימתו של פיזיקאי: **"המבחן העליון של הפיזיקאי הוא מציאת אותם חוקי טבע אוניברסליים, שמהם ניתן לבנות את 'תמונת העולם' על-ידי דדוקציה טהורה"**. במסה אחרת על מדע (1936) כותב אינשטיין שמטרת המדע היא **"... הבנה, שלמה ככל שאפשר, של הקשר בין מכלול התצפיות... השגת המטרה הזאת על-ידי מספר מינימלי** (הדגשת המחבר) **של מושגים ויחסים בסיסיים, תוך חיפוש של אחדות לוגית בתמונת העולם, ככל שניתן..."**

אינשטיין לא היה הראשון שהאמין כי העולם מתנהג על-פי סדר קבוע, וכי ניתן להסביר אותו על-ידי מספר קטן יחסית של חוקים. הפילוסופים הקדם-סוקרטים ניסו להעמיד את הטבע כולו על בסיס אחד. הפילוסוף היווני תאליס ממילטוס, שחי במאה השישית לפני הספירה ונחשב על-ידי אריסטו לאבי הפיזיקה, האמין שכל החומר הקיים, כל הגופים וכל התופעות, הוא צורות שונות של מים. חברו, אנקסימיניס ממילטוס, האמין שהחומר היסודי מרכיב-הכל הוא האוויר. ההיסטוריון והפיזיקאי ג'רלד הולטון טבע בהקשר של תפיסת טבע זו את המושג "הקסם היווני" (Ionian enchantment).

הולטון התייחס אל הניסיונות הפילוסופיים הראשוניים לבנות "תיאוריה פשוטה של הכל". הפילוסופיה היוונית ניסתה להגיע לידע כולל ומאחד של התופעות. במקום שבו כל "תחום ידע" מתייחס לאספקט אחר של המציאות, הפילוסופיה היוונית מנסה לעסוק במכלול הדברים ובשיטה אחת, הלוקחת את הריבוי והופכת אותו לאחדות. המאמץ האנושי הזה, שהחל 600 שנה לפני הספירה ביוון, נמשך בתקופות שונות על-ידי פילוסופים ומדענים, ומגיע לשיא ברעיון המודרני להסברת החומר והיקום ב"תורת המיתרים" – תיאוריה המתיימרת לאחד את כל הכוחות הידועים בטבע ולהניח בסיס אחד לכל תחומי הפיזיקה המוכרים לנו.

אדוארד ויטן, מאבות תורת המיתרים, כותב: "אני מרגיש שאנו נמצאים עכשיו בתהליך בנייה של תיאוריה עמוקה יותר מכל דבר שהיה קודם, וכי בהמשך המאה ה-21 יצטרכו פיזיקאים צעירים להחליט, אם אמנם מצאנו את התיאוריה הסופית"

מה שייחד את אינשטיין ממדענים אחרים הוא, שלצד עבודותיו המדעיות אנחנו מוצאים הרבה מאוד מאמרים, רשימות ומכתבים לעמיתים, שבהם הוא מתאר בצורה עקבית את המניעים, המהלכים והמטרות של עבודתו. כל אלה מעידים על הצורך הפנימי שלו להכליל, מתארים את התשוקה שלו להבין ואת השאיפה שלו לפשט ולאחד תחומים. אינשטיין מאמין בעולם שיש בו חוק וסדר, וחשוב מכך – בעולם שדרך פעולתו וסך כל מרכיביו ניתנים להבנה באמצעות התבונה. האמונה הזאת היא מקור לרגש הדתי שהוא חש לנוכח ההרמוניה שהוא מזהה ביקום.

1905 – "השנה המופלאה"

כבר בשני המאמרים הראשונים של אינשטיין מהשנים 1901–1902, אליהם הוא עצמו התייחס כאל "התחלות חסרות ערך", יש עדות למוטיבים שיעסיקו אותו כל חייו. המאמרים עוסקים בכוחות מולקולריים, ואינשטיין מתייחס שם לאנלוגיה בין כוחות אלה וכוחות הכבידה של ניוטון. זהו ביטוי ראשון לתוכניתו הגדולה לאחד כוחות שונים בטבע ולמצוא קשרים בין העולם המיקרוסקופי והמקרוסקופי. בזמן שעבד על המאמרים האלה, אינשטיין כתב לידיד: **"זאת הרגשה נפלאה להכיר באחדות של תופעות, אשר נראות לנו כדברים שונים לחלוטין"**. שנת 1905 סיפקה לו הרבה רגעים של "הרגשה נפלאה" כזאת.

1905 מכונה "השנה המופלאה" של אינשטיין. לכינוי זהה זכתה בהיסטוריה של המדעים 1666, השנה במהלכה כתב ניוטון שורה של עבודות במתמטיקה ובפיזיקה, שהפכו לאבני היסוד של המדע. בשנת 1905 פרסם אינשטיין, שהיה אז בן 26, ארבעה מאמרים אשר שינו תפיסות עולם והניחו יסודות לפיזיקה המודרנית. להלן הכותרות של מאמרים אלה (מתורגמות מילולית מגרמנית):

1. **"על נקודת מבט היאוריסטית הנוגעת ליצירה ולהתמרה של אור"**
2. **"על תנועת חלקיקים קטנים המרחפים בנוזלים במנוחה המתחייבת מן התורה הקינטית-מולקולרית של החום"**
3. **"על האלקטרודינמיקה של גופים נעים"**
4. **"האם ההתמדה של גוף תלויה בתכולת האנרגיה שלו?"**

המאמר הראשון עוסק במהות האור ועיקרו ביסוס ההנחה ש"... **בקרן אור הנפלטת ממקור נקודתי, האנרגיה אינה מחולקת באופן רציף בנפח הולך וגדל של המרחב, אלא מורכבת ממספר סופי של קוונטים של אנרגיה המרוכזים בנקודות במרחב, נעים בלי להתחלק ויכולים להיווצר או להיקלט רק כיחידות שלמות**". העובדה שאלומת אור מתנהגת כזרם של חלקיקים בעלי אנרגיה מוגדרת, סללה את הדרך לתורת הקוונטים. במאמר הזה מופיע הסבר של האפקט הפוטו-אלקטרי עליו זכה אינשטיין בפרס נובל ב-1921.

המאמר השני עוסק בתנועה של חלקיקים קטנים בנוזל. ב-1828 גילה הבוטנאי רוברט בראון, שהתבונן באמצעות מיקרוסקופ בחלקיקי אבק על פני נוזל, שהם מבצעים תנועה אקראית מתמדת. במשך המאה ה-19 הוצעו הסברים רבים ושונים לתופעה זו, המכונה "תנועה בראונית", וכולם נדחו. מקובל אמנם לראות במאמר הזה של אינשטיין מחקר על התנועה הבראונית, אבל יש בכך כדי להמעיט מערכו. אינשטיין

"מפליא שכל הגילויים התרחשו בשנה אחת, על-ידי אדם אחד, צעיר בן 26, שלא במסגרת עבודה באוניברסיטה או במוסד מחקר. האדם הזה קיבל זמן קצר לפני כן תעודה של מורה בתיכון והועסק במשרה מלאה כפקיד במשרד הפטנטים. כל עבודתו חייבת היתה להיעשות בזמנו החופשי"

לא עבד על התנועה הבראונית ולא כתב את המאמר הזה כדי להסביר אותה. אינשטיין התעניין ביסודות של תורת הגזים הקינטית ובתנאים שבהם אפשר לצפות בתנודות מהירות בערכם של גדלים פיזיקליים מקרוסקופיים. המאמר הזה, והאישור הניסויי של המסקנות שלו, הניחו את היסודות לתרמודינמיקה סטטיסטית והסירו לתמיד את הספקות לגבי המבנה המולקולרי של החומר, שהיו עדיין קיימים באותה תקופה.

שני המאמרים האחרונים מכילים את הניסוח הראשון של תורת היחסות הפרטית של אינשטיין ואת אחת המסקנות החשובות שלה: הקשר בין מסה ואנרגיה, המתבטא בנוסחה $E=mc^2$. תורת היחסות הפרטית מבוססת על שתי הנחות: הראשונה – מהירות האור קבועה ולא תלויה במהירות הצופה או מהירות מקור האור. כדי להסביר את ההנחה השנייה נשתמש במטפורה שבה השתמש גם אינשטיין: אדם נמצא בקרון רכבת שנוסעת במהירות קבועה עם חלונות סגורים ועל גלגלים משומנים היטב. אין שום ניסוי שהוא יכול לערוך, שילמד אותו משהו על תנועת הרכבת ביחס לרציף. זהו עקרון היחסות, הקובע **שכל חוקי הפיזיקה זהים במערכות הנעות במהירות קבועה**. העיקרון הזה היה ידוע בהקשר של חוקי המכניקה בלבד. אינשטיין הרחיב אותו לכל תחומי הפיזיקה. שתי ההנחות הכל-כך פשוטות לכאורה היו מנוגדות לדעות בהן החזיקו פיזיקאים בני זמנו של אינשטיין, ונדרש מהמדען הצעיר אומץ לא מבוטל לפרסם אותן.

משתי ההנחות האלה נגזרות כל המסקנות על האופי היחסי של מדידות במרחב ובזמן. שני צופים הנעים אחד ביחס לשני לא יסכימו ביניהם על אורך נמדד של עצמים, על זמן נמדד על-ידי שעונים, ועל השאלה אם שני מאורעות מתרחשים בו-זמנית או לא. אם נכליל את עקרון היחסות מן המכניקה לתופעות האלקטרומגנטיות נקבל, שמה שנראה בעיני צופה אחד כשדה חשמלי, יכול להיראות בעיני צופה אחר הנע ביחס אליו כשדה מגנטי.

בשלהי המאה ה-19 ובראשית המאה ה-20 בוצעה שורה של ניסויים שלא היה להם הסבר, והם העלו סימני שאלה רציניים לגבי הנחות בסיסיות של הפיזיקה. אף אחד מהמאמרים של אינשטיין משנת 1905 אינו מתחיל בתיאור הניסויים האלה, ולא נכתב כדי לתת להם הסבר. כל אחד מהם מתחיל בהערות על חוסר הנחת שלו מאספקטים מסוימים של הנחות היסוד של הפיזיקה הקלסית. בכל אחד מהמאמרים הוא מציע עקרונות חדשים בעלי תחולה רחבה, שמסוגלים לטפל בגורמי "אי-הנחת". בכל אחד מהם תחזיות שניתנות לבדיקה בניסוי.

לדוגמה, השאלה שהטרידה את אינשטיין במאמר "על האלקטרודינמיקה של גופים נעים", היא הא-סימטריה בתיאור התופעות במערכת של מוליך ומגנט הנעים אחד ביחס לשני. התיאוריה של מקסוול מבחינה בין המקרה שבו המגנט נמצא בתנועה והמוליך במנוחה, לבין המקרה ההפוך. אינשטיין קובע שמדובר באותה תופעה, הקשורה בתנועה היחסית בין המוליך והמגנט, והוא מניח שגם בתופעות אלקטרודינמיות, כמו בתופעות מכניות, אין מערכת מנוחה. מההנחה הזאת, ומההנחה על הקביעות של מהירות האור, נגזרת אלקטרודינמיקה של גופים נעים שלא קיימת בה הא-סימטריה המוזכרת לעיל, ועימה כל תורת היחסות הפרטית.

אפשר לראות בעבודתו של אינשטיין בשנת 1905 מאמץ לגשר בין התחומים השונים של הפיזיקה של תקופתו – מכניקה, תורת החום ואלקטרודינמיקה – ולאחד אותם למבנה קוהרנטי אחד. אינשטיין הצליח במשימה הזאת, ותוך כדי כך הוא מצא קשרים חדשים בין מושגים כמו זמן ומרחב, מסה ואנרגיה, שדות חשמליים ומגנטיים. העננים שהעיבו על שמי הפיזיקה הקלסית התפזרו אחרי 1905.

מן היחסות הפרטית לכללית

כל עבודתו של אינשטיין ב-1905 נעשתה במסגרת המאמצים לענות על שאלות ולויישב בעיות שהיו על סדר יומה של הפיזיקה בשלהי המאה ה-19 ובראשית המאה ה-20. אלמלא היה קיים, קרוב לוודאי שרוב המסקנות של עבודתו מאותה שנה היו מתקבלות במוקדם או במאוחר. מה שמפליא הוא שכל הגילויים התרחשו בשנה אחת, על-ידי אדם אחד, צעיר בן 26, שלא במסגרת עבודה באוניברסיטה או במוסד מחקר. האדם הזה קיבל זמן קצר לפני כן תעודה של מורה בתיכון והועסק במשרה מלאה כפקיד במשרד הפטנטים בברן שבשוויץ. כל עבודתו חייבת היתה להיעשות בזמנו החופשי. זהו הישג חסר תקדים, וזאת הסיבה ששנת 1905 תישאר תמיד "שנה מופלאה" בתולדות הפיזיקה.

בניגוד לנאמר לעיל, לא היתה אף תופעה או דילמה בעולם המדע אשר ניתבה את אינשטיין לפתח את תורת היחסות הכללית. מדובר במאמץ ובמחקר מדעי שנעשה בלי שום קשר לסדר היום המדעי של התקופה, ושסיבתו היתה חוסר הנחת של אינשטיין מתורת היחסות הפרטית. תיאוריה זו התייחסה רק למערכות הנעות במהירות קבועה, ואינשטיין הרגיש כי תורה שאינה מתייחסת למערכות מואצות, ושאינה כוללת את תופעת הכבידה, אינה שלמה. מעבר לזה, תורת הכבידה של ניוטון, המבוססת על כוחות הפועלים מרחוק ועל השפעה מיידית של מסה אחת על שנייה, לא התיישבה עם היחסות הפרטית, שבה השפעה בין שני גופים לא יכולה להתקדם מהר יותר ממהירות האור.

"אינשטיין, בכיר אנשי המדע, הציב לפיזיקה ולפיזיקאים אתגר: למצוא את העקרונות הבסיסיים שמהם אפשר לגזור את כל התופעות בעולם בתהליך לוגי של דדוקציה. במסגרת משימה גדולה זו הוא ניסה לאחד את הכוחות האלקטרומגנטיים וכוחות הכבידה למערכת אחת"

The New York Times.
EINSTEIN REDUCES ALL PHYSICS TO 1 LAW
The New Electro-Gravitational Theory Links All Phenomena, Says Berlin Interpreter.
ONLY ONE SUBSTANCE ALSO
Hypothesis Opens Visions of Persons Being Able to Float in Air, Says N. Y. U. Professor.

ה"סקופ" של הניו יורק טיימס מ-1929. כל הפיזיקה בחוק אחד

בספרו "היחסות – התורה הפרטית והכללית", שיצא ב-1916, כותב אינשטיין: "**אחרי האישור של העיקרון הפרטי של יחסות, כל יצור אינטלקטואלי אשר שואף להכללה, חייב להרגיש פיתוי לנקוט צעדים לקראת העיקרון הכללי של יחסות**". המאמץ להשלים הכללה זאת ארך כעשר שנים, והוא חייב פיתוח של כלים מתמטיים משוכללים. ביסוד העניין עומד עקרון השקילות בין תאוצה וכבידה. פירוש הדבר הוא, שאין שום ניסוי אשר יקבע אם צופה נמצא בשדה כבידה אחיד המושך אותו כלפי מטה, או שהוא נע בתאוצה קבועה כלפי מעלה. זהו עקרון היחסות הכללי, הקובע שחוקי הפיזיקה נראים זהים לצופים גם במערכות הנעות בתאוצה אחת כלפי השנייה.

מעיקרון זה נגזרת תמונה חדשה של המרחב, של הזמן ושל הכבידה. המרחב-זמן אינו במה פסיבית, שבתוכה נעים גופים חומריים כמו בתמונת העולם של ניוטון. למרחב-זמן יש דינמיקה משלו, והוא מתעקם בהשפעה של גופים הנעים בתוכו. גופים נמשכים זה לזה לא בגלל כוח מסתורי הפועל מרחוק, אלא מפני שכל אחד מהם נע בעקמומיות הנוצרת במרחב על-ידי הגוף השני.

תורת היחסות הכללית, אשר נחשבת כמבנה האינטלקטואלי המשוכלל ביותר אשר נוצר במוחו של אדם אחד, היא כל-כולה תוצאה של הצורך של אינשטיין להכליל. המסקנות השונות של תורת היחסות הכללית אושרו בניסויים ובתצפיות. התחזית שהמסלולים של קרני אור המגיעות אלינו מכוכבים רחוקים מתעקמים בשדה הכבידה של השמש, אושרה בתצפיות של משלחת אסטרונומית בריטית ב-1919. הדבר זכה לכיסוי עיתונאי נלהב, ואינשטיין הפך בן לילה לכוכב עליון.

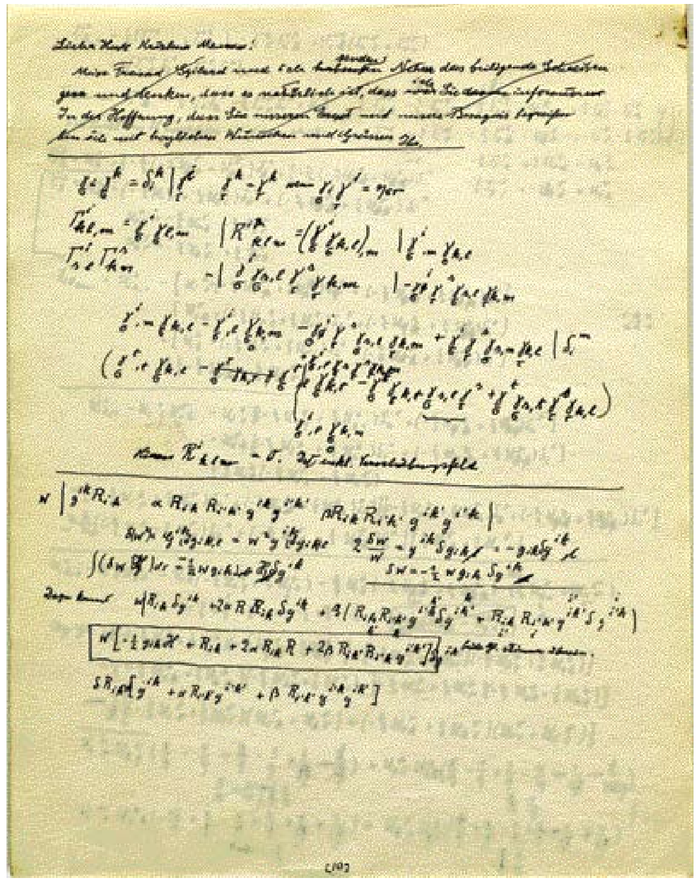
אולי אחד הניסיונות המפורסמים בתולדות המדע. משלחת בראשותו של ארתור אדינגטון יצאה למערב אפריקה, כדי לצלם את מהלך ליקוי החמה ולזהות אם האור היוצא מכוכבים מוסט כשהוא עובר ליד השמש. תוצאת הניסוי אוששה את תורת היחסות הכללית של אינשטיין והפכה אותה לתיאוריה המובילה

המסע הכושל לקראת תורת השדה המאוחד

גם אחרי ההצלחה הכבירה לשלב בין תורת היחסות ותורת הכבידה, שילוב שהוליד את תורת היחסות הכללית, אינשטיין לא היה מרוצה. זמן קצר אחרי פרסום המאמר הוא שם לעצמו מטרה לאחד את שדה הכבידה עם השדה האלקטרומגנטי במסגרת של מודל מתמטי אחד. הקיום הנפרד שלהם לא התקבל על דעתו, וגם המשוואה המרכזית של תורת היחסות הכללית לא סיפקה אותו. באגף שמאל שלה מופיע ביטוי המתאר את עקמומיות המרחב-זמן, והוא תוצאה של הניסוח המתמטי של המעבר בין מערכות ייחוס שונות. אגף ימין, המייצג את החומר והאנרגיה, אינו נובע מהתיאוריה. אינשטיין האמין שחלקיקי החומר צריכים להופיע בפתרונות של המשוואות המתארות את שדה הכבידה. במסגרת התורה המאוחדת הוא קיווה למצוא הסבר לקיום החומר ולתכונות הבסיסיות שלו – המסה והמטען החשמלי. בתורה כזאת ערכי המסה והמטען החשמלי של האלקטרון והפרוטון (שני החלקיקים האלמנטריים שהיו ידועים אז) צריכים לנבוע מהתיאוריה עצמה – כלומר, הם צריכים להתקבל כתוצאה של חישוב.

דרכו של אינשטיין למימוש המטרה הזאת היתה דרך חתחתים של טעויות ותיקוני טעויות, שלו ושל אחרים. ראוי לציין שלב אחד בדרך הזאת, הקשור בעקיפין לאוניברסיטה העברית בירושלים. ב-1923 הסכים אינשטיין לשמש כעורך של קובץ מאמרים בהוצאת "כתבי האוניברסיטה ובית הספרים בירושלים". אינשטיין לא הסתפק בתפקיד העורך, אלא תרם לקובץ מאמרים שעסק בנושאי פיזיקה ומתמטיקה מאמר מפרי עטו, שנכתב עם יעקב גרומר, פיזיקאי יהודי צעיר שעבד איתו בברלין. גרומר תרגם את המאמר לעברית.

המאמר מגיב על רעיון של המתמטיקאי הגרמני תיאודור קלוזה, אשר הציע מודל מקורי של שדה מאוחד שמשך את תשומת לבו של אינשטיין. קלוזה הציע להוסיף למודל הארבעה-ממדי של המרחב-זמן של אינשטיין



רישום פיתוחים מתמטיים במחברתו האחרונה. נרשם ימים ספורים לפני מותו
© האוניברסיטה העברית בירושלים

ממד נוסף. הממד החמישי במודל החמישה-ממדי של קלוזה מקופל לגליל בעל קוטר קטן מאוד, והוא מייצג את המטען החשמלי. במשך 30 שנה בקירוב אינשטיין חזר שוב ושוב לרעיון השדה האלקטרומגנטי המופיע בתורת כבידה בחמישה ממדים. המאמר המשותף שלו ושל גרומר, שהתפרסם במקום נידח ויוצא דופן, מוזכר מדי פעם בשנים האחרונות במסגרת הגלגול המודרני של המאמץ לנסח תיאוריה המאחדת את כל הכוחות הידועים בטבע – "תורת המיתרים". כאן הרעיון בא לידי ביטוי על-ידי הוספה של שישה או שבעה ממדים מרחביים נוספים לאלה המוכרים לנו.

כאשר עמיתיו הפיזיקאים של אינשטיין התחילו לפקפק בתוכניתו לאחד את שני עמודי התווך של הפיזיקה ולראות ברעיון מקסם שווא, הציבור הרחב והתקשורת עדיין עקבו בהתלהבות אחרי מאמציו. ב-30 בינואר 1929 פרסם אינשטיין מאמר בן חמישה עמודים בנושא האחדה, שהוא ראה בו פריצת דרך אמיתית. כמעט כמו בימינו, טרם פרסום המאמר תוכנו הודלף לעיתונות, והעיתונאים הכינו את הציבור לקראת גילוי מלהיב חדש של הגאון אלברט אינשטיין. ה-New York Times דיווח על כך מספר פעמים במשך חודש ינואר. חמישה ימים לפני פרסום המאמר של אינשטיין כתב העיתון בעמודו הראשון: "**אינשטיין מצמצם את הפיזיקה כולה לחוק אחד; התורה החדשה קושרת את כל התופעות; חומר אחד בלבד; התיאוריה פותחת אפשרויות של ציפת אנשים באוויר – עבודתו החדשה של פרופ' אלברט אינשטיין, 'תורת שדה חדשה', אשר תצא מן הדפוס בקרוב, מצמצמת את החוקים הבסיסיים של החשמל והמכניקה היחסית למשוואה אחת...**" שנה בלבד לאחר פרסום המאמר אינשטיין נאלץ להודות בטעות.

בעקבות כישלונו וההסתייגות של עמיתיו הפיזיקאים מרעיונותיו אינשטיין הרגיש כמעט מנודה מהקהילייה המדעית, אך הדבר לא הרתיע אותו, והוא התמיד בניסיונות לנסח תורה של שדה מאוחד עד יומו האחרון. במשך השבוע האחרון לחייו, כאשר היה מרותק למיטתו בבית-חולים, אינשטיין ביקש שיביאו לו את המחברת שבה רשם את הפיתוחים המתמטיים הקשורים לרעיונות האחרונים שלו בדרך למימוש המטרה הזאת.

עקרון ה"צמצום" ועקרון ה"בנייה"

יש קסם גדול בתיאוריה כוללת. האם קיים הסבר אחד לכל תופעות הטבע, או שאולי מדובר בשאיפה אוטופית לשלמות המתקיימת רק בהכרתנו? אולי נכון לראות ב"קסם היוני" מעין מלכודת ולהתייחס אליו כאל "אשליה יוונית" (Ionian fallacy), כפי שסבר הפילוסוף ישעיהו ברלין? אינשטיין, בכיר אנשי המדע, הציב לפיזיקה ולפיזיקאים אתגר: למצוא את העקרונות הבסיסיים שמהם אפשר לגזור את כל התופעות בעולם בתהליך לוגי של דדוקציה. במסגרת משימה גדולה זו הוא ניסה לאחד את הכוחות האלקטרומגנטיים וכוחות הכבידה למערכת אחת.

התוכנית היומרנית של אינשטיין לבנות "תיאוריה של הכל" מעוררת שתי שאלות. הראשונה, האם תיתכן תורה מאוחדת כזאת ומערכת אחת של משוואות מתמטיות, אשר פרמטרים שונים בתוכה מייצגים את שני הכוחות שהיו ידועים בזמנו, או את ארבעת הכוחות הידועים לנו היום? והשנייה, אם תהיה לנו מערכת כזאת של עקרונות בסיסיים, האם נוכל להסיק ממנה בלבד את כל התופעות המתרחשות בעולם שלנו?

השאלה הראשונה נוגעת לעקרון ה"צמצום" (רדוקציוניזם) במדע. האם ניתן להעמיד את כל התופעות על עיקרון בודד או על עקרונות ספורים של הפיזיקה? אינשטיין היה משוכנע שהתשובה חיובית. בראיון שנערך איתו ב-1929 הוא אמר בביטחון: "**עכשיו אנחנו יודעים, סוף-סוף, שהכוח המניע את האלקטרונים במסלולים אליפטיים סביב גרעין האטום הוא אותו כוח שמניע את כוכבי הלכת במסלולים השנתיים שלהם סביב השמש. זהו אותו כוח המביא לנו גלי אור וחום ומאפשר חיים על פני הארץ**". אינשטיין לא ידע את זה אז, ואנחנו איננו יודעים את זה עד היום.

באשר לשאלה השנייה, התשובה היא כנראה שלילית. ב-1972 פרסם הפיזיקאי פיל אנדרסון, בעל פרס נובל על תרומותיו הרבות לחקר המצב המוצק, מאמר תחת הכותרת "יותר זה שונה", ובו הוא טען שמהיכולת לצמצם את כל התופעות למספר חוקי יסוד לא נובעת האפשרות להתחיל לבנות את היקום מהחוקים האלה. עקרון ה"בנייה" לא מתקיים בשל קשיים של גודל ומורכבות.

אנדרסון מתאר את המדע כהיררכיה ליניארית של מדעים בסדר עולה של מורכבות – פיזיקה של חלקיקים אלמנטריים, פיזיקה אטומית, פיזיקה של מצב מוצק, כימיה, ביולוגיה מולקולרית, ביולוגיה של התא, פיזיולוגיה... פסיכולוגיה, מדעי החברה. התופעות בכל אחד מהשלבים בהיררכיה זאת מצייתות לחוקים של השלב הקודם, אבל זה אינו אומר שכל שלב הוא אפליקציה של השלב הקודם. "**בכל שלב דרושים מושגים, הכללות וחוקים חדשים, המחייבים יצירתיות והשראה במידה לא פחותה מאשר בשלב הקודם. פסיכולוגיה אינה ביולוגיה שימושית, וביולוגיה אינה כימיה שימושית**", הוא כתב. בכל שלב יש תופעות של התארגנות עצמית ושל תכונות מתגלות. למאמר של אנדרסון היתה השפעה רבה על התגבשות של תחום מחקר חדש, המכונה לעיתים "מדע המורכבות". תחום זה עוסק במערכות עם מספר רב של מרכיבים, שיש ביניהם אינטרקציה ונוצרות בהם תופעות, שקשה להסביר אותן רק על סמך התכונות של המרכיבים האינדיבידואליים והיחסים ביניהם. מערכות כאלה נמצאות בתחומים שונים של מדעי הטבע וחברה.

המורשת

אינשטיין נשאר נאמן כל חייו לדרך ולמטרות שהציב לעצמו. רבים תוהים מדוע הוא נשאר אדיש לחלוטין להתפתחויות דרמטיות בעולם הפיזיקה שחלו בזמנו – הופעת הפיזיקה הגרעינית, ועימה גילוי של כוחות חדשים; התקדמות במחקר הפיזיקה של מצב מוצק, ועימה גילוי של מעברי פאזה חדשים; המחקר הרחב על מבנה כוכבים ועוד. ייתכן שהתשובה לכך נעוצה בחוסר ההשלמה שלו עם תורת הקוונטים, המשחקת תפקיד מרכזי בכל ההתפתחויות האלה. בכל מקרה, אינשטיין הסתגר בדל"ת אמות של "הקסם היוני" שלו והתרחק מהזרם המרכזי של המדע ושל קהיליית המדע.

האם אינשטיין בזבז 30 שנה על ניסיונות כושלים למצוא תורת שדה מאוחדת? היום אנו מאמינים שהמאמץ שלו לא היה לשווא. אחרי התפתחות הפיזיקה הגרעינית וגילוי שני כוחות בסיסיים נוספים של הטבע, הכוח החזק והכוח החלש, רשמה הפיזיקה המודרנית בשנות ה-70 של המאה ה-20 הישג מרשים. השילוב של הכוח האלקטרומגנטי עם שני הכוחות החדשים הביא לפיתוח "המודל הסטנדרטי", המתאר בצורה נאמנה את הפנומנולוגיה של עולם החלקיקים.

עכשיו האתגר העיקרי העומד בחזית המחקר בפיזיקה הוא לממש את חלומו של אינשטיין, אלא שהיום המשימה היא לאחד את כל ארבעת הכוחות הידועים בטבע. אלפי חוקרים ומדענים מקדישים את עבודתם המדעית לקידום המשימה הזאת. הרעיונות של אינשטיין זוכים לעדנה ולבחינה מחודשת ומעוררים כיווני מחקר מגוונים. גם אם איננו בטוחים שתיאוריה מאחדת היא בגדר האפשר, המשימה הזאת נשארה, וצריכה להישאר תמיד, המטרה העליונה של המחקר המדעי. ייתכן שההכרה הזאת היא מורשתו המדעית החשובה ביותר של אינשטיין. ■

mshanoch@mscc.huji.ac.il

דודי גולדמן

מחפשים בית חדש

יותר מאלפיים שנים של תצפיות אסטרונומיות וחקר היקום הגיעו השנה לשיאם. המין האנושי שלח את הטלסקופ "קפלר" לחפש בחלל כוכבים הדומים לכדור הארץ, ושניתן יהיה לקיים בהם חיים. דודי גולדמן מתאר מסע שמתחיל באי סאמוס שביוון

מחפשים בית הדומה לכדור הארץ.
תמונה: Visual Photos

■ האדם המערבי המודרני כמעט ואינו רואה במהלך חייו את הרקיע שמעליו. אנו גרים בערים גדולות המוארות בעוצמה וגם בטיולי הטבע מזדמן לנו רק לעיתים רחוקות לזכות בלילה בהיר לגמרי ולחוות במלוא העוצמה את היופי של שמיים נוצצים במיליוני כוכבים. המחזה המופלא הזה היה בעבר שגרת יומם של כל בני האדם. עם רדת החשיכה הלכו בני האדם לישון כשכיפת רקיע מסתורית נעה מעל ראשם והם מסוגלים לעקוב בעין אחר תנועת הכוכבים, הירח ומטר כוכבי השביט הנשרפים בדרכם אלינו.

מראה השמיים בלילה, כמו תנועת השמש במשך היום, ריתקו את בני האדם משחר ההיסטוריה. הקשר בין עונות השנה וגרמי השמיים היה ברור, אך מסתורי. מיתוסים ואמונות משולבים בתצפית ובמדידה הפכו את האסטרונומיה למדע המפותח הראשוני והחשוב של המין האנושי. כמעט בכל התרבויות העתיקות נקשר קשר בין גורל האדם, אופיו ועתידו לבין תנועת הכוכבים בשמיים. האלים זוהו עם גרמי השמיים ואלי השמש, הירח והכוכבים פעלו ככוחות מרכזיים המשפיעים על האדם ועתידו.

תצפיות ורישומים של תנועת הכוכבים נמצאו כבר אצל השומרים והבבלים לפני כ־5,000 שנים. תיאוריות על צורת כדור הארץ, מיקומו ביקום והחומר ממנו הוא עשוי קיימות בכל תרבות, כאשר דמיון יצירתי ואמנותי משתלבים עם נתוני החושים בבניית מיתוסים ואגדות על מהות היקום.

אריסטרכוס מהאי סאמוס ביוון, שחי בשנים 310 ועד 230 לפני הספירה היה האסטרונום המתועד הראשון שניסה למדוד את מרחק כדור הארץ מהשמש והציע מודל אסטרונומי שבו כדור הארץ סובב את השמש. לא ברור מניין שאב את הרעיון שכל־כך נוגד את החושים שלנו, אך הרעיון נדחה על הסף ולאורך כ־1,500 שנים שלטה בתרבות המערבית שיטתו של גדול האסטרונומים של העת העתיקה, תלמי מאלכסנדריה. בשיטה מורכבת ומעניינת בנה תלמי תיאוריה מדויקת ויעילה לחיזוי תנועת הכוכבים במסלולם. בבסיס התיאוריה הציב את כדור הארץ במרכז היקום וכוכבי הלכת והשמש נעו סביבו.

תלמי קבע כי סביב כדור הארץ נעים לפי הסדר – הירח, כוכב חמה, נוגה, השמש, מאדים, צדק ושבתאי. מעבר למסלולו של שבתאי היו קבועים, לדבריו, כוכבי השבת. בעזרת מודל גיאומטרי שכלל מעגלים ומעגלי משנה (אפיצקלים), ובדומה לגלגלי שרשרת באופניים מודרניות, תיאר תלמי את תנועת הכוכבים.

האזור בשביל החלב אליו צופה הטלפסקופ "קפלר"
צילום:נאס"א

התיאוריה של תלמי אומצה בהתלהבות בקרב ראשי הכנסייה הקתולית והחזיקה מעמד עד למהפכה הקופרניקאית.

באופן מפתיע, תיאוריה לא נכונה שאינה מתארת את המציאות, יכולה היתה לנבא בדיוק יחסי את תנועת הכוכבים ועונות השנה ולאפשר מדידה מדויקת של זמן. כלומר, למרות שהפרדיגמה כולה היתה בלתי נכונה בעליל, התוצרים שהניבה היו נכונים ושימושיים. תלמי היה מודע לחולשה מסוימת במודל, ובעיקר הצטער על כך שתנועת הכוכבים אינה מעגלית ומושלמת כפי שהאמינו שהיא צריכה להיות. יתירה מזאת, גם כאשר במהלך מאות שנים לאחר מותו של תלמי נמצאו שגיאות ואי־דיוקים בחישוביו, הם עברו "התאמה" למודל הגיאוצנטרי שלו, בלי שיוטל ספק שמא המודל אינו נכון. פסיכולוגים מודרניים יגידו שלמודל הזה היתה הלימה לאופי הנרקסיסטי של תרבות המערב, ובמיוחד לזה של אנשי הכנסייה, שכן הוא הניח שכדור הארץ הוא במרכז היקום ובני האדם הם נזר הבריאה.

1,500 שנים חלפו עד שניקולס קופרניקוס האסטרונום הפולני פרסם את ספרו, "דה רבולוציוניבוס – על הסיבובי של ספירת הרקיע", שבו הציע את המהפכה המפורסמת בתולדות המדע: הוא הפך את היוצרות, הציב

>>

את השמש במרכז והניע את כדור הארץ וכוכבי הלכת סביבה. למרות התנגדות הכנסייה, התקבלה התיאוריה ההליוצנטרית במהירות יחסית, בעיקר מכיוון שהיתה פשוטה יותר. "בשום דרך אחרת לא נמצא התאמה מופלאה וזיקה הרמונית ודאית בין המסלול ובין תקופת ההקפה של כוכב", קבע קופרניקוס בספרו ואנשי המדע הרנסנסים השתכנעו בקלות.

גליליאו גליליי (1642־1564) נתן את הדחיפה להכרה בקופרניקוס. הוא בנה את הטלסקופ הראשון והפנה אותו לשמיים. האפשרות שיש קשר בין תיאוריה לבין תצפית ונתוני החושים היתה חדשה ומרתקת. גליליאו הוכיח בפועל כי "שביל החלב" כולל מספר עצום של כוכבים, ובכך היה הראשון שהרחיב את תמונת היקום שלנו אל מעבר למערכת השמש. גליליאו שכלל את הטלסקופ וגילה בין היתר את ירחי צדק, את פניו ההרריים של הירח ואת כתמי השמש. הוא היה לאדם שהפריך יותר מכל קודמיו את תפיסת העולם הקוסמולוגית של אריסטו ושל תלמי.

במאות ה־16 וה־17 פרחה האסטרונומיה באירופה. הגרמני יוהנס קפלר, שחי בין 1571 ועד 1630, היה הראשון שטען כי כוכבי הלכת נעים במסלול אליפטי ולא במסלול מעגלי. הוא הסכים עם קופרניקוס ועם גלילאו על התפיסה ההליוצנטרית, אבל לא הסכים איתם בנוגע לתנועה המעגלית. הוא צדק. המדען והפילוסוף האיטלקי ג'ורדנו ברונו אימץ את הרעיון של קופרניקוס, עמדה שעלתה לו בחייו והוא הוצא להורג בידי הכנסייה הקתולית בקמפו די־פיורי, הכיכר היפהפייה ברומא, שהיום מוצב בה פסלו. ברונו האמין שהיקום הוא אינסופי, כלומר אין לו גבולות, וכי אותם חוקי טבע החלים בכדור הארץ חלים גם על כוכבים אחרים. האסטרונומים הפעילים כיום לא מנסחים את התיאוריה הזו בצורה שונה בהרבה.

עד לפני פחות ממאה שנים, בשנות ה־20 של המאה הקודמת, נחלקו האסטרונומים לשתי קבוצות. האחת טענה שהגלקסיה שלנו, "שביל החלב", היא היקום כולו. מנגד היו שטענו שחלק מהערפילים שנצפו בטלסקופים

"ב־6 במארס 2009 שיגרה נאס"א טלסקופ חדש ומשוכלל לחלל. הטלסקופ 'קפלר', על שמו של האסטרונום יוהנס קפלר, נשלח למשימה רבת־חזון: למצוא כוכב לכת, מחוץ למערכת השמש, שיהיה דומה לכדור הארץ, כלומר שיהיה בעל תנאים תומכי חיים לאדם"

הם גלקסיות נפרדות. בשנת 1920 התקיים ויכוח מדעי גדול באוניברסיטת קיימברידג', שהסתיים לא הכרעה. תשע שנים מאוחר יותר פרסם אדווין האבל, האסטרונום האמריקני הגדול, מדידות שביצע ומהן עלה כי מדובר בגלקסיות נפרדות. כך, בשנת 1929 "זינק" היקום מגיל צעיר של כמה עשרות־אלפי שנות אור לעשרות־מיליוני שנות אור. לאחר כמה שנים גילה האבל כי היקום מתפשט, ומכאן צמחה תיאוריית המפץ הגדול.

בספרי הלימוד ניתן למצוא בדרך כלל תיאור של מערכת השמש שבה תשעה כוכבי לכת. כיום יודעים האסטרונומים על 150 אלף גופים הסובבים את השמש ומסווגים בקטגוריות שונות: כוכבי לכת, כוכבי לכת ננסיים, גופים טרנס־נפטונים, אסטרואידים, שביטים, קנטאורים וגופים קטנים נוספים במערכת השמש. כמות הידע והנתונים החדשים שבידינו עצומה. בשנת 2006 החליט האיגוד הבינלאומי לאסטרונומיה לשנות את ההגדרה של כוכב לכת ולקבוע סוג חדש הנקרא כוכב לכת ננסי, כמו למשל קרס, פלוטו ואריסיכולת. התצפיות, הצילום מהחלל והמכשור המשוכלל הגדילו משמעותית את קו האופק. הטלסקופים החדישים בחלל מביטים אל עבר תחילת היקום ורגע המפץ הגדול ומעבירים אלינו צילומים שמאפשרים גילויים חדשים. חומרים שלא הכרנו מתגלים בחלל ומשנים את התיאוריה שלנו על מבנה החומר. המהפכה האסטרונומית והכרת היקום הן אולי התקווה הגדולה ביותר לעתיד המין האנושי.

ב־6 במארס 2009 שיגרה נאס"א טלסקופ חדש ומשוכלל לחלל. הטלסקופ "קפלר", על שמו של האסטרונום יוהנס קפלר, נשלח למשימה רבת־חזון: למצוא כוכב לכת, מחוץ למערכת השמש, שיהיה דומה לכדור הארץ, כלומר שיהיה בעל תנאים תומכי חיים לאדם. המטרה לטווח המאוד־רחוק היא למצוא מקום, מחוץ למערכת השמש ועדיין בתחומי הגלקסיה, "שביל החלב", שבו נוכל להקים פעם מושבת קבע בחלל. המיזם הזה, שייארך כשלוש וחצי שנים, הוא ככל הנראה המשימה השאפתנית ביותר עד כה ב"כיבוש החלל".

אנשי נאס"א מעריכים כי ישנם עשרות כוכבים הדומים לשמש, ברדיוס של 30 שנות אור ממנה. ההנחה היא כי סביב מחציתם יש לפחות כוכב לכת אחד הדומה לכדור הארץ. בנאס"א מאמינים שיש סיכוי לא רע למצוא כמה כדורי ארץ ברדיוס שבין עשרה ועד 30 שנות אור מהשמש. לדבריהם, יש אף סיכוי שעל כמה מהם מתקיימים חיים, אף שהצפי הוא שמדובר בחיים של חיידקים, בדיוק כפי שהיה על כדור הארץ לפני שלושה עד ארבעה מיליארד שנים.

הידיעה על השיגור והמשימה הכל־כך מרעישה ומעוררת דמיון עברה בשקט, כמעט בלי לקבל ביטוי בתקשורת. כבר הורגלנו ל"הרחבת הגבולות" של היקום, לצילומי ננסים לבנים וחורים שחורים ולתיאורים על היקום, שלא כולנו מצליחים להבין. ובכל זאת, בעידן של אנושות מסוכסכת ומפולגת, טוב לזכור כי הרעיונות שנולדו אצל תלמי הבשילו עד לשליחתו של "קפלר" למסע חיפוש אחר כוכב דומה לכדור הארץ, כוכב שבו אולי יוכל המין האנושי לבנות בית ולהמשיך ולהתקיים. האדם פותח לעצמו אופקים חדשים ובמסע של "קפלר" והתקדמות חקר החלל, יש הרבה תקווה וביטחון לעתיד האדם ■

dudig@netvision.net.il

דודי גולדמן הוא כתב לענייני מדע של "ידיעות אחרונות"

$$N = R^* \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times L$$

הנוסחה הרשומה למעלה היא ששכנעה את ממשלת ארצות־הברית ותורמים פרטיים להשקיע כסף רב בפרויקט חיפוש אחר חיים בחלל. הנוסחה אינה קובעת חוק טבע ואינה מציגה פענוח של מרכיבי החומר או גודל היקום. זוהי נוסחה סטטיסטית המחשבת הסתברויות. פיתח אותה אסטרונום ואיש מדע אמריקני בשם פרנק דרייק. בשנת 1961, טען דרייק כי הנוסחה שפיתח מעניקה **הסתברות סבירה לקיומה של ציוויליזציה בשביל החלב** המסוגלת ומנסה לתקשר איתנו באמצעות גלי רדיו. נוסחת דרייק היתה משכנעת מספיק כדי להוציא לדרך שורה של מבצעי חיפוש אחר חיים ביקום. בעקבות נוסחה זו פותחו פרויקטים של חיפוש חיים בחלל. **נוסחת דרייק מורכבת מכמה משתנים הניתנים להערכה כמותית מדויקת יחסית ומכמה משתנים שאותם ניתן רק לשער:**

N – הוא נושא החיפוש שלנו: מספר הציוויליזציות הקיימות שמנסות ליצור איתנו קשר רדיו. R^* – הוא כמות הכוכבים בגלקסיה שלנו. f_p – הוא מספר הכוכבים שיש להם מערכות שמש. n_e – הוא כמות מערכות השמש שיש בהן כוכבי לכת במרחק מתאים מהשמש, ושניתן לקיים בהן חיים. f_l – הוא כמות כוכבי הלכת, שהתפתחו בהם חיים. f_i – הוא אותו חלק מכוכבים אלה, שהתפתחו לדרגה שהם מסוגלים לשלוח איתותי תקשורת. f_c – הוא מספר התרבויות שצמחו מתוך הכוכבים המפותחים ואשר פעלו כדי ליצור התקשרויות עם גורמים בחלל. L – הוא תוחלת הקיום הסבירה של ציוויליזציה כזו. על־פי הערכת דרייק (ולטענתו עשה חישוב שמרני), **פיתרון המשוואה הנכון מציב את N על כעשרת־אלפים**.

פרנק דרייק וחוקרים בתחנת האזנה. אימג' בנק

כלומר, קיימות כעשרת־אלפים ציוויליזציות בשביל החלב שניסו או מנסות לתקשר איתנו. **נוסחאות דומות פותחו בעקבות דרייק** ונעשה בהן שימוש במחקר, כמו גם בספרות המדע הבדיוני. לנוסחה מבקרים רבים. הביקורת העיקרית מתרכזת במספר המצומצם של משתנים בנוסחה וטוענת שמספר המשתנים הרלוונטיים יכול להיות גדול בהרבה. גם ההנחה שבכוכב דומה לנו יתפתחו חיים היא בעייתית. מספר המשתנים שאיפשרו היווצרות חיים על כדור הארץ וההסתברות שתנאים כאלה אכן יתקיימו בכוכב אחר, הינה נדירה ביותר. אם אחד מגורמים אלה שואף לאפס, הרי שתוצאת החישוב כולו תשאף גם היא לאפס. בכל הפרויקטים הקיימים כיום ואשר עוסקים באיתור סימני חיים בחלל, לא התקבלו בינתיים סימנים להודעות תבוניות שנשלחו אלינו מרחבי היקום.

רבקה פלדחי

"היו אלה רעיונותיו בנוגע לשני הספרים – ספר הטבע וספר כתבי הקודש – שקראו תיגר באופן האמיץ ביותר על סמכות התיאולוגים. שני הספרים, טען בחיבורו המפורסם "מכתב לדוכסית הגדולה כריסטינה מלורן", נבדלים זה מזה מבחינת התכנים, השפה, קהל היעד והמטרות"

להסתכל, לראות, להבין

בסתיו 1609 הביט גליליאו גליליי בפעם הראשונה אל השמיים באמצעות הטלסקופ המשוכלל שבנה. הפרשנות שהעניק לתופעות שאותן ראה שינתה את השיח האסטרונומי. במקומו של יקום אריסטוטלי מלא בכדורים מושלמים ונצחיים, הופיעו ירח, שמש וכוכבים הדומים בצורתם ובטבעם לכדור הארץ. הפרשנות החדשה של גליליאו חיברה את גרמי השמיים אל עולם התופעות הארציות, פיצלה בין ספרי הקודש לספרי הטבע ויצרה זיקה בין הצופה המיומן – האסטרונום – לקהלים משכילים ולכוח הפוליטי

תמונה מן המאה ה–19, בה לבוש גליליאו בבגדי חצרן, מגיש את הטלסקופ כמתנה לפטרונו קוזימו דה מדיצ'י. Visual Photo

"הפילוסופיה כתובה בספר הכביר הזה, היקום, העומד תמיד פתוח למבטנו... הוא כתוב בשפת המתמטיקה, ואותיותיו הן משולשים, מעגלים ושאר צורות הגיאומטריה. אך לא ניתן להבין את הספר קודם שמבינים את שפתו ולומדים לקרוא את האותיות שבהן נכתב".

(גליליאו גליליי, "שוקל המתכות" 1623)

■ בשנת 1610, חודשים ספורים אחרי שבנה את הטלסקופ הראשון שלו, פרסם גליליאו גליליי חוברת קטנה שכותרתה "שליח הכוכבים" (Sidereus nuncius). החוברת הכילה דו"ח שיטתי ראשון על כמה תצפיות שמימיות מכריעות אותן ערך בעזרת הטלסקופ החדש. בדיווח על מה שראה חולל גליליאו מהפך בשיח האסטרונומי שהיה המקובל עד זמנו. השנה, 400 שנים מאוחר יותר, חוגג העולם את שנת האסטרונומיה כמחווה לבניית הטלסקופ הגליליאני – המכשיר שפתח לנו חלון הולך ומתרחב להבנת היקום.

"שליח הכוכבים" נכתב לאחר שהושלמה עבודה מאומצת על בניית המכשיר האסטרונומי החדש ושכלולו עד לרמת הגדלה של פי עשרים. פרסום תוצאות התצפית הפך את גליליאו, פרופסור מכובד אך בעל משכורת דלה באוניברסיטת פדובה, שהשלים הכנסה בהדרכה או באמצעות אירוח תלמידים פרטיים בביתו, למעין חצרן ובעל מעמד נכבד בחצרו של דוכס טוסקנה, קוזימו דה–מדיצ'י.

הטקסט חישמל את "רפובליקת הידע" המצומצמת של אותם ימים. עד לפרסומו היה קופרניקוס מתימטיקאי עלום יחסית שפרסם שבעים שנה לפני כן ספר "**על אודות הסיבובים של גרמי השמיים**" (De revolutionibus orbium caelestium, 1543). החיבור הגדול

>>

"גליליאו הבין במהירות את האפשרויות הגלומות בטלסקופ להרס הירדכיית אריסטו וההפרדה בין אובייקטים נראים לבלתי-נראים. גרמי השמיים, שעל־פי אריסטו לא ניתנים לידיעה, הופכים לאובייקטים ניתנים לידיעה והכרה. הטלסקופ מצמק את פער הנראוּת בין אובייקטים שמימיים לארציים"

>> והמהפכני נותר בלתי נקרא ובלתי מובן לא רק לקהל הרחב, אלא אף למרבית האסטרונומים המקצועיים בני התקופה. "שליח הכוכבים" של גליליאו הפך את רעיונותיו של ניקולאוס קופרניקוס לזרעים שמהם תתפתח המהפכה האסטרונומית המכאנית שחולל אייזיק ניוטון. גליליאו שינה את מעמדו של קופרניקוס וסלל דרך למהפכה תאורטית בתחום המחקר האסטרונומי.

התצפיות הטלסקופיות שלו זיהו אובייקטים חדשים שמעולם לא נראו לפני כן – כוכבי שבת רבים מספור וארבעת ירחי צדק. סיפור תגליותיו אלה של גליליאו ידוע למדי ואינו עומד במוקד הדיון שלי. אני רוצה להדגיש דווקא את הפרשנות החדשה שנתן גליליאו למה שראה באמצעות הטלסקופ – פרשנות על פניו המחוספסים של הירח, כמו גם הסברים חדשים על אורו המשני ועל טבעו של שביל החלב. גליליאו פיתח שיח ייחודי וחדש סביב האובייקטים שגילה בשמיים, שהציב אתגר לשיח הסכולסטי המקובל עד לתקופתו ושגרם למהפכה גדולה בתפיסה ובהבנת היקום.

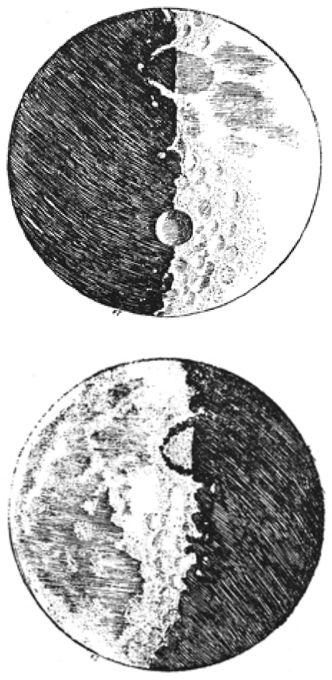
הסכולסטי: שיטת דיון פילוסופית שהייתה מקובלת עד המאה ה-15. מאפייני השיטה הם דיון והסבר של טקסטים וניתוחם. הדיון הסכולסטי מנסה לבסס את האמונה באמצעות הוכחות שכליות ולא על־פי כתבי הקודש לבדם

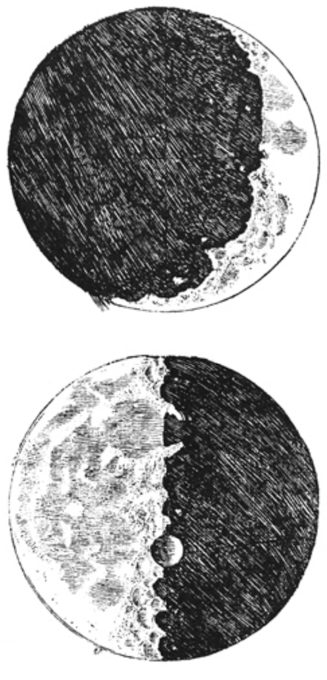
הרחבת תחום האובייקטים הנראים

הקישור בין יכולת האדם לראות ויכולתו לדעת מופיע לראשונה בכתבי אריסטו. הוא טבע את אבחנתו המפורסמת בין אובייקטים על-חושיים מושלמים ולא משתנים כמו גרמי השמיים, לבין אובייקטים ארציים לא מושלמים כמו אבנים, חיות וצמחים. אריסטו כתב: "**מבין הדברים שיצר הטבע, מקצתם נצחיים, מעולם לא נוצרו ולעולם לא ייהרסו, בעוד אחרים נתונים להתהוות ולכליה. הראשונים מושלמים לאין שיעור ואלוהיים, אך נגישים פחות לידע.**" לדעתו, גרמי השמיים מצויים מעבר לכושר התפיסה שלנו בגלל נשגבותם. אפשר להכיר אותם רק "**ככל שהדבר נמצא בהישג ידן של השערותינו**". את הדברים החומריים שבקרבם אנו חיים – אלו שקרובים אלינו ודומים לנו למדי – ניתן לראות ולהכיר בוודאות ו"בשלמות".

הרעיון שניתן וצריך להרחיב את תחום האובייקטים הנראים לנו אל מעבר לגבולות שהציג אריסטו היה מקובל במיוחד בקרב האמנים ההומניסטים של הרנסנס. ליאון בטיסטה אלברטי (1404–1472), בחיבורו על הפרספקטיבה, הביע לראשונה את הרעיון שבהטמעת ידע מתמטי לתוך העולם החומרי ניתן להרחיב ולהעצים את שדה הראייה האנושי: "**המתמטיקאים מודדים את**

הפרספקטיבה: הדרך להמחיש שעצם מרוחק קטן יותר מעצם קרוב. הפרספקטיבה היא מושג מתמטי של זמן ומרחב. היא משמשת בציור ואדריכלות. רק במאה ה-15 הצליחו ציירים להכניס פרספקטיבה בציוריהם. הבנת הפרספקטיבה פתחה את הדרך גם לחקר חדש של תנועת הכוכבים





רישומים המתארים את פני הירח, שרשם גליליאו לאחר תצפיות בטלסקופ שלו

צורות הדברים בשכל בלבד, לאחר שנותקו לגמרי מהחומר. אנחנו, לעומת זאת, שואפים להפוך אותן לאובייקט נראה". (אלברטי, "על הציור")

פיתוח טכניקות הפרספקטיבה בציור, ובלשונו של אלברטי – הפיכת דברים מתמטיים לאובייקטים נראים – עמדו במוקד הפרויקט של איש האשכולות האיטלקי. בו-בזמן הוא פיתח "אתוס" מיוחד שאיפשר לציירים הומניסטים להצדיק את מה שנתפס בעיניו ובעיני בני דורו כערעור אקטיבי של הצייר על הגבולות שבין הטבעי למלאכותי.

אלברטי לא היה בודד בחזונו. דוגמה בולטת נוספת היא ניקולאוס קוזאנוס (1401–1464), שערך ניסיון יוצא דופן לכלול בפרויקט הרחבת שדה האובייקטים הנראים לא רק ישויות מתמטיות תיאורטיות, אלא גם את הבלתי-נראה האולטימטיבי – אלוהים. הוא הרים את הכפפה שזרק אלברטי בדמות מערכת הפרספקטיבה שלו והציע באומץ תיאולוגיה חדשה המבוססת על שאיפה לראות את הבלתי-נראה. "**ואולם, אנו רוצים לראות את ההתחלה הבלתי-נראית עצמה**". באחד מחיבוריו המאוחרים יותר הציע ניסוי שבו משמשת אבן בֶּריל כמעין עדשה: "**אבני בריל הן בהירות, לבנות ושקופות,**" כתב. "**ניתן להעניק להן צורה קעורה וקמורה כאחד. ומי שיביט דרכן יראה מה שלפני כן היה בלתי-נראה**".

השיח על הנראה והבלתי-נראה מצביע על הרקע התרבותי הרלוונטי להבנת האסטרטגיות של גליליאו בהצגת תצפיותיו הטלסקופיות. השינוי שהתרחש מעוגן בתרבות החומרית של בעלי המקצוע ובשיח של אמנים ותיאולוגים הומניסטים. גליליאו הבין במהירות את האפשרויות הגלומות בטלסקופ להרס היררכיית אריסטו ולביטול ההפרדה בין אובייקטים נראים לבלתי-נראים. גרמי השמיים, שעל-פי אריסטו לא ניתנים לידיעה מושלמת, הפכו לאובייקטים ארציים ניתנים לידיעה ולהכרה. הטלסקופ צימק את פער הנראוּת בין אובייקטים שמימיים לארציים על-ידי הגדלת הממדים והצגה בהירה של אובייקטים מרוחקים.

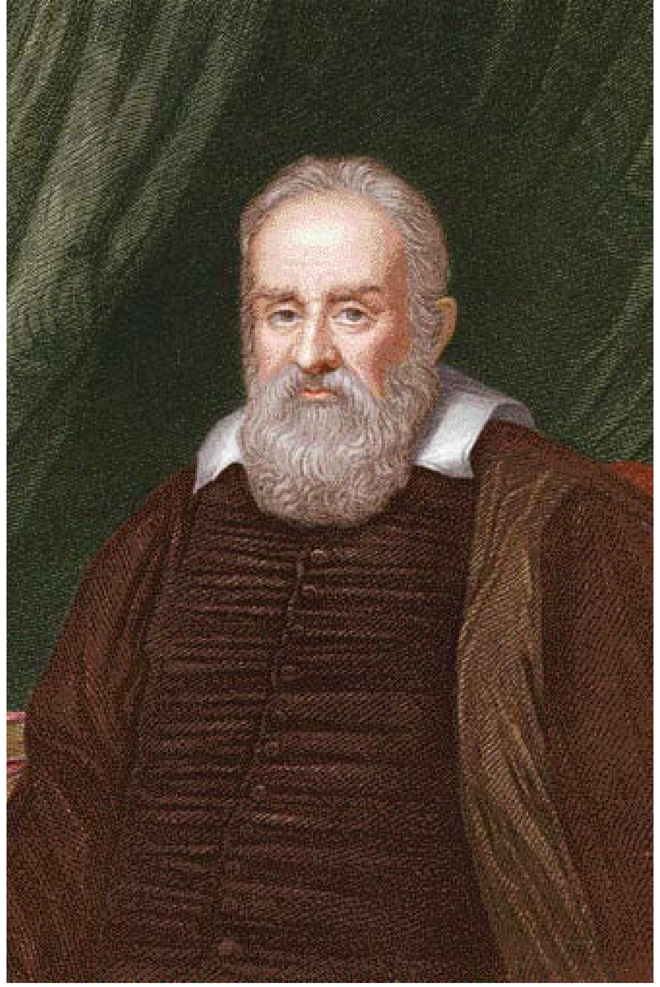
הפעולה של גליליאו אינה מובנת מאליה. האפשרויות הטכניות שפתח המכשיר החדש לא הובילו בהכרח לשיח אסטרונומי חדש. האסטרונום והמתמטיקאי האנגלי, תומס האריוט (1560–1621), צפה בשמיים בטלסקופ תוצרת הולנד שבועות אחדים לפני גליליאו. בעזרת הטלסקופ ראה את הכתמים על הירח ואף ייצג אותם על הנייר. הוא ראה אותם דברים שראה גליליאו, אך לא זיהה על פני הירח הרים או עמקים. הפרשנות של גליליאו לתצוגת הטלסקופ היא שיצרה את התמונה החדשה. מכאן ניתן להסיק שבלי בקיאות אמנותית, ובהיעדר שלל הפעולות הטקסטואליות שגליליאו יישם כדי להפוך בצורה אקטיבית את הכתמים הנראים בטלסקופ לאובייקטים מוחשיים – לא היה סיכוי שהכתמים ימלאו את תפקידם כאובייקטים חדשים שמשנים את השיח האסטרונומי.

הפיכת הנראה לחומרי ומוחשי

"שליח הכוכבים" מספק לנו דוגמה נפלאה לדרך שבה הפכו התצפיות לאובייקטים בסוג חדש של שיח אסטרונומי. אם נתמקד לרגע בירח, נוכל לעקוב מקרוב אחרי האסטרטגיות של גליליאו: זיהוי וסיווג הכתמים; מיפויים; ייצוגם בטכניקות מילוליות וברישומים ולבסוף, בעזרת תיאוריה של פיזור האור, פרשנות שלהם כהרים וכעמקים אנלוגיים לאלה שקיימים על כדור הארץ.

גליליאו סיווג תחילה שני סוגי אזורים על פני הירח הנשקפים אלינו: "**בהיר יותר וכהה יותר. נראה שהבהיר יותר מכתר וממלא את חצי הכדור כולו, בעוד האזור הכהה יותר מעכיר את פני הירח בדומה לענן, ויוצר בהם מעין כתמים**". לאחר מכן הוא סיווג שני סוגי כתמים על פני הירח: "**הכתמים הכהים יחסית והגדולים למדי בולטים לעין ונצפו מאז ומתמיד; אכנה אותם כתמים 'גדולים' או 'עתיקים', כדי להבדילם מהאחרים, שהם קטנים יותר אך נפוצים כל-כך שניתן לראותם על כל פני הירח, במיוחד באזור הבהיר**". הפרשנות פותחת בקו הלא-אחיד (משונן) שזיהה גליליאו בירח בן הארבעה או חמישה ימים, כמפריד בין האזור האפל שלו לאזור המואר. הקו המשונן שימש עבורו עדות לפני השטח המחוספסים של הירח.

פרצי אור, ממשיך גליליאו, חוצים את הקו המפריד וחודרים לאזור האפל ממש כשם שאזורים חשוכים פורצים את הקו המשונן לעבר האזור המואר. יתרה מזאת, הצד המואר מנוקד כולו בכתמים שחורים רבים, <<



גליליאו. הבין את מערך הכוחות החברתי והפוליטי. Visual Photo

>> נפרדים לחלוטין מן האזור האפל. גליליאו הבחין שחלקיהם הכהים של אותם כתמים שחורים פונים לעבר השמש, בעוד שהחלקים שפונים הלאה מהשמש מוקפים בקווי מתאר זוהרים, אותם מדמה גליליאו לפסגות הרים זוהרות על פני כדור הארץ.

האנלוגיה הזו נמצאת במרכז הפשר החדש והמהפכני שהעניק גליליאו לכתמים. בהדרגה הם מאבדים את צבעם השחור והאזורים המוארים גדלים. גליליאו מפרש את מראית העין שלו במונחים של אור מתפזר בהדרגה מפסגות ההרים של הירח אל עבר עמקיו. הכתמים גדלים בהדרגה ונעשים בהירים יותר ויותר, עד שהם מתלכדים עם שאר האזור המואר.

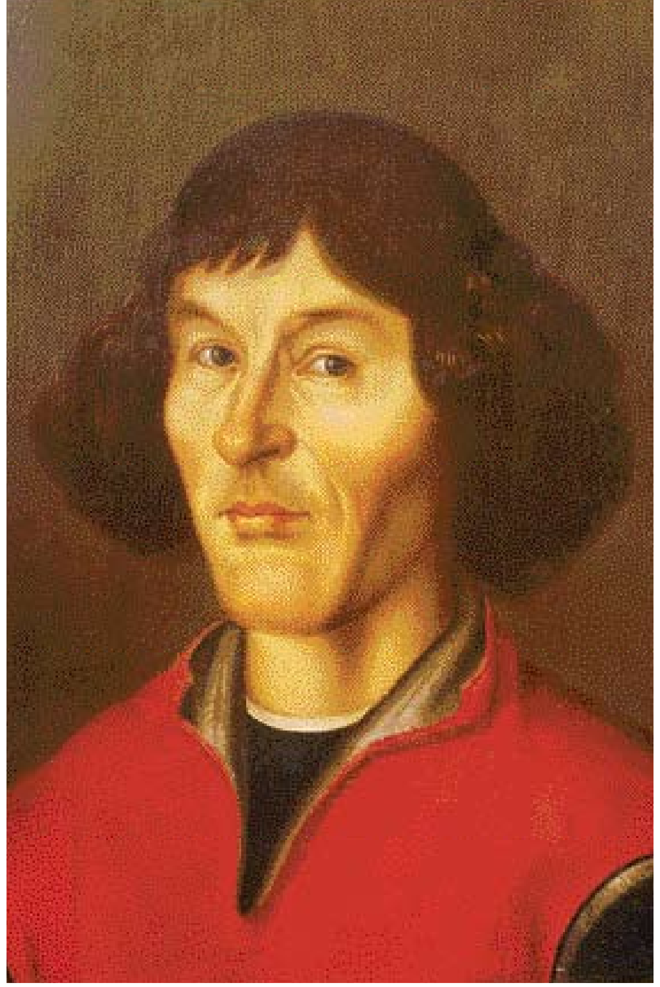
כך, בפעם הראשונה, הפך הירח בהדרגה מגוף שמימי, עשוי כפי שקבע אריסטו מחומר שקוף מושלם, נצחי ובלתי משתנה, לגוף שאינו שונה במהותו מן הארץ עליה אנו חיים ואותה אנו מכירים. גליליאו לא מסתפק בתיאור הזה. הוא שב ומתאר מה קורה לפרצי האור באזור האפל ומפרש את התופעה במונחים דומים. הנה כך מתאר גליליאו את החיזיון הדינמי של האור על פני ירח הזרוע שלשלות ההרים והעמקים.:

"**לא זו בלבד שניתן לראות שהגבול בין אור לחשיכה על הירח אינו אחיד ומפותל, אלא – מה שמפתיע אף יותר – מתוך האזור החשוך של הירח מבצבצות המוני נקודות אור נבדלות לחלוטין, מופרדות לגמרי מהאזור המואר ומרוחקות ממנו מרחק הגון. כאשר מחכים זמן–מה, הן הולכות ונעשות גדולות ובהירות יותר, ולאחר שעתיים–שלוש מצטרפות לשאר האזור המואר שכעת נעשה רחב יותר. אך בינתיים מפציעות נקודות אור חדשות מתוך האזור החשוך; דומה שהן נובטות כלפי מעלה, גדלות והולכות ומתאחדות זו עם זו עד שהן מתלכדות עם פני הקרקע המוארים המתרחבים והולכים**" ("שליח הכוכבים").

אך בכך עדיין לא מתמצה תהליך הפיכת הירח מ"שמימי" ל"ארצי". הייצוג המילולי והפרשנות נשזרו בייצוג פלסטי - סדרת ציורים (ראה איור בעמוד קודם) של מופעי הירח, שליוותה את הטקסט. בשנים האחרונות עוררה המשמעות של בקיאות אמנותית בכל הנוגע להבנת תופעות הטבע את תשומת לבם של החוקרים, ביניהם איילין ריבס (Eileen Reeves) והורסט ברדקמפ (Horst Bredekamp), שעסקו בציורי הירח של גליליאו.

שניהם הפנו את תשומת הלב לשליטתו המופלאה של גליליאו במכחול הצייר להאצלת איכות חומרית אמיתית לציורי הירח הללו, וליכולתו להבדיל בין גווני הצל של האזורים החשוכים וליישם בדייקנות טכניקות של אור–צל להמחשת התפשטות אור השמש על פני הירח ולציון האור המשני המוחזר מכדור הארץ והנופל על הירח.

"ההתרשמות המצטברת מקריאת קופרניקוס היא שהאובייקטים (הכוכבים במסלולם במקרה זה) מרוקנים באופן שיטתי מתכניהם החושיים והפיזיקליים. בשיח הקופרניקני, מה שנראה לעין איננו מה שבנמצא, בעוד שמה שבנמצא שונה ממה שנראה לעין"



קופרניקוס. בנה יקום תאורטי. Visual Photo

היו שטענו שהיכולת לצייר בנאמנות את מה שראה היוותה מרכיב חיוני בתפיסת גליליאו את גרמי השמיים במונחים של תופעות ארציות ידועות היטב, כמו פיזור אור. אין ספק שלציורי הירח היתה השפעה משכנעת עזה על הקהלים הרחבים יחסית שקראו את הטקסט. באמצעות ציורי הירח והערות גליליאו לגביהם, יכלו להרגיש שהם קוראים את "ספר הטבע" הלכה למעשה.

הטמעת הנראה בדיבור האסטרונומי המסורתי

השוואה בין האופן שבו נתפסו גרמי השמיים בשיח האסטרונומי של קופרניקוס לבין התפקיד שמילא הירח בשיח האסטרונומי החדש של גליליאו מעידה על שתי אסטרטגיות מנוגדות של הבניית אובייקטים. ההתרשמות המצטברת מקריאת קופרניקוס היא שהאובייקטים (הכוכבים במסלולם במקרה זה) מרוקנים באופן שיטתי מתכניהם החושיים והפיזיקליים. בשיח הקופרניקני, **מה שנראה לעין איננו מה שבנמצא, בעוד שמה שבנמצא שונה ממה שנראה לעין**. כך, למשל, תנועת הנסיגה הנצפית של כוכבי הלכת נתפסת כמשקפת את התנועה הנסתרת של כדור הארץ סביב השמש, שהרי האחרונה אינה מותירה כל רישום על חושינו. לא נובעת ממנה שום פרלקסה (היסט בזווית ממנה נצפים כוכבי השבת כתוצאה מן התנועה של הארץ) ניתנת לצפייה (בטלסקופים ששימשו את גליליאו, בני דורו ומעבר לכך), לא נוצרת שום רוח חזקה על פני הארץ, שום ענן או ציפור שסוטה מן המסלול, שום אבן הנופלת מרום המגדל ונותרת מאחור.

לעומת זאת, הטלסקופ של גליליאו מילא את היקום הסטרילי של קופרניקוס במציאויות הנתפסות בחושים. השיח שלו ארגן מחדש את מרחב הנראוּת שנועד להקנות משמעות במונחים ויזואלים לתיאור היקום של קופרניקוס. אולם גליליאו היה חייב לשלב את האובייקטים החדשים לתוך השיח האסטרונומי המסורתי, שמאפיינו הבולט היה שימוש בשפה גיאומטרית. האסטרונומיה המסורתית היתה מתמטית מעיקרה. האובייקטים העיקריים שלה היו מודלים גיאומטריים, ששימשו ככלים הנאותים ביותר לייצוג ולניבוי של תנועות כוכבי הלכת.

גליליאו הבין שעליו להציג את חידושיו באותה שפה גיאומטרית. ניסיונו למדוד את גובה הרי הירח הוא דוגמה מושלמת הממחישה כיצד התכוון למזג את חידושיו אל תוך השיח האסטרונומי המבוסס (ראה תרשים משמאל). בעודו פועל מצד אחד להפוך את המופשט לקונקרטי, הוא מפשיט, מצד שני, את הקונקרטיות של גוף הירח הנצפה, כדי שיוכל למדוד ולתאר אותו בעזרת מודל גיאומטרי (שרטוט). כך הצליח להגיע >>

>> לקירוב לא רע של גובהו של הר על הירח – ארבעה מילין – בהשוואה לגובה המקסימלי של ההרים על כדור הארץ – מייל אחד (הערכה מוטעית כמובן).

סוג חדש של סמכות

ניתן לראות ב"שליח הכוכבים" מאורע טקסטואלי שגילם את פרשת הדרכים בין מסורות שונות של ייצור ידע. בניית הטלסקופ והשימוש בו לחקר הטבע האמיתי של גרמי השמיים חיזקו, בצורה דרמטית, נטיות של העת החדשה המוקדמת למזג יחד בקיאות טכנולוגית ואמנותית, לחבר תחומים כמו ליטוש עדשות וציור, עם תשובות חדשות לשאלות מסורתיות וחדשות באופטיקה, באסטרונומיה ובפילוסופיה של הטבע.

גליליאו חש בצדק שייטיב לעשות אם לא יגביל את המסר שלו לבעלי מקצועות מתמטיים, ציירים, פילוסופים של הטבע, או אסטרונומים מומחים. מעורבותו בתרבות הפוליטית של זמנו העמיקה את הבנתו, שאם לא יפיץ את תגליותיו לחוגים הולכים ומתרחבים של צרכני תרבות הרנסנס החדשה – וחשוב יותר, אם לא ירכוש את תמיכתו של פטרון חזק – לא יוכל להגשים את הפרויקטים השאפתניים שלו.

כך, מעצם המשחק ששיחק בעת ובעונה אחת במגרשים אינטלקטואליים שונים, נטל לעצמו גליליאו תפקיד חלוצי בהופעתו של שדה דיון חדש, שהיה מדעי ופוליטי כאחד. הכותרת המלאה של חיבורו מציינת ש"שליח הכוכבים" נועד לחשוף "**מחזות כבירים, יוצאים מגדר הרגיל וראויים לציון" ו**מייעדת את המסר שלו **ל"כל אדם ואדם**". הכותרת גם משמשת את גליליאו להצגה עצמית מקדמית כג'נטלמן, מתמטיקאי מומחה וממציא איש פירנצה. ולא פחות חשוב: גליליאו מציג את עצמו כ"מחבר", תואר שהאציל לו את הסמכות לכנות את ירחי צדק שגילה בשם "כוכבי מדיצ'י".

שלא במפתיע, את הטקסט הקדיש גליליאו לפטרונו לעתיד, קוזימו דה-מדיצ'י. במכתב ההקדשה לנסיך, קבע גליליאו הירככיה בין אמנים המשרתים את נסיכיהם עם חפצים החשופים לשיני הזמן; מחברים המציגים בפני פטרוניהם טקסטים, שאותם תפס גליליאו כ"מונומנטים ספרותיים"; ופילוסופים של הטבע כמו גליליאו עצמו, שיכלו להציע לנסיכיהם (במקרה זה, קוזימו) את תגליותיהם הטבעיות (במקרה זה, ירחי צדק).

בזמנו של גליליאו, שיח הבארוק בחצרות השליטים היה שיח אלגורי. גליליאו, שהפליא לשלוט בכללי השיח הזה, השתמש במומחיות זו להעברת מסר מורכב ורב-משמעי לנסיך ולשאר קוראיו. מנקודת מבט אחת, נסבה כותרת הטקסט על הכוכבים החדשים השולחים את המסר שלהם לעולם. ברמה אחרת, התירו כללי השיח האלגורי למחבר לבחור את האנלוגיה הנכונה ואת כיוונה. וכך, נסב מן הסתם "שליח הכוכבים" של גליליאו לא על המסר מהכוכבים לקוראים ותו לא, אלא על גליליאו עצמו – כנושא, מתווך ואולי אפילו היוצר של התהילה שנפלה בחלקו של קוזימו באמצעות כוכבי מדיצ'י, שהתגלו בידי הפילוסוף שלו, דהיינו גליליאו.

בין פילוסופיה, מדעים מתמטיים ותיאולוגיה

ניתן להבחין באופן ברור בהשלכות האסטרטגיות של השיח החדש שיצר גליליאו בשני חיבורים נוספים שכתב, בין פרסום "שליח הכוכבים" (1610) לבין הסנקציות הראשונות של האינקוויזיציה כנגד הקופרניקניזם (1616).

בחיבורו "היסטוריה והוכחות בנוגע לכתמי השמש ותופעותיהן" (1613), הבהיר גליליאו את מטרתו לאחד את הפילוסופיה של הטבע עם האסטרונומיה המתמטית ולהציע תחום חדש שאותו כינה "אסטרונומיה פילוסופית". התחום החדש נועד לחקור את "מערכת העולם" הארצית והשמימית כאחד. לצורך זה הגדיר גליליאו מחדש את התפקיד המסורתי של האסטרונום שנחשב עד אז למתמטיקאי של השמיים, ולא לפילוסוף של הטבע.

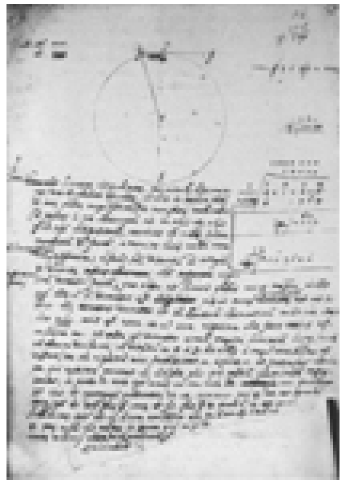
הוא טען כי "**מצדדי האסטרונומיה הפילוסופית מתקדמים אל מעבר לדרישה 'להציל את התופעות" בדרך כלשהי, מבקשים לחקור את המבנה האמיתי של היקום – הבעיה החשובה ביותר והנערצת ביותר שבנמצא. שכן מבנה כזה קיים; הוא ייחודי, אמיתי, ממשי, ולא יתכן שיהיה שונה מכפי שהוא; וגדולתה ונשגבותה של בעיה זו מתירות לה להתייצב בראש כל השאלות הכשירות לפתרון תיאורטי**" ("היסטוריה והוכחות בנוגע לכתמי השמש").

גליליאו עיצב מחדש את המטרות המסורתיות של פילוסופיית הטבע. מתפקידה, כך טען, לא לבקש לחדור אל מהות הדברים, אלא להתרכז בתכונות הגיאומטריות של האובייקטים ולהתקדם לתופעות מסובכות יותר ויותר:

"**שהרי במהלך עיוננו אנו מבקשים לחדור למהות האמיתית והפנימית של סובסטאנסים טבעיים, או שאנו מסתפקים בידע על כמה מתכונותיהם. המשימה הראשונה, כך אני סבור, היא בלתי אפשרית, הן בנוגע לסובסטאנסים הקרובים ביותר, העשויים יסודות ארציים, והן באשר לעצמים השמימיים המרוחקים יותר... [ואולם] אף שלשווא נבקש לקבוע את טיב הסובסטאנס האמיתי של כתמי השמש, עדיין אין פירוש הדבר שלא נוכל לדעת כמה מתכונותיהם, למשל המיקום, התנועה, הצורה, הממדים, שיעור האטימות, יכולת ההשתנות, היצירה והפירוק שלהם**" ("היסטוריה והוכחות").

בהירככיה שקבע גליליאו תפסו לפתע האסטרונומים הפילוסופיים את המעמד הבכיר בשדה התרבותי של תקופתו. ממדע מתמטי מעורב בעל מעמד נחות מזה של הפילוסופיה והתיאולוגיה בהירככיה של המדעים, הפכה האסטרונומיה הפילוסופית למפתח שטומן בחובו פתרונות לשאלות היסודיות ביותר אודות היקום. אין פלא כי פרויקט זה הרחיק מעליו את הפילוסופים המסורתיים באוניברסיטאות, שכן הוא מתח ביקורת חריפה על התכנים והמתודולוגיה שלהם.

אבל היו אלה רעיונותיו של גליליאו בנוגע לשני הספרים – ספר הטבע וספר כתבי הקודש – שקראו תיגר באופן האמיץ ביותר על סמכות התיאולוגים. שני הספרים, טען בחיבורו המפורסם "מכתב לדוכסית



שרטוט גיאומטרי אותו רשם גליליאו לחישוב גובה הרי הירח

הגדולה כריסטינה מלורן" (Lettera a Madama Cristina di Lorena Granduchessa di Toscana, 1615), **נבדלים זה מזה מבחינת התכנים, השפה, קהל היעד והמטרות**.

"**סמכות כתבי הקודש נועדה בראש ובראשונה לשכנע את הבריות בנוגע לטענות ולעיקרים שבהיותם מעבר לכל תבונה אנושית, לא ניתן לגלותם בחקירה מדעית או בכל דרך אחרת, להוציא מפי רוח הקודש עצמה... מחברי כתבי הקודש לא זו בלבד שלא התיימרו ללמדנו על מבנה ותנועות השמיים והכוכבים, כמו גם צורתם, ממדיהם ומרחקם, הם אף נמנעו במכוון מלעשות זאת**".

לא זו בלבד שכתבי הקודש עוסקים בבעיות של אמונה וישועה, שגליליאו הפרידן מבעיות של הבנת הטבע ואמיתותיו; אלא, ההבדל עמוק כעומקה של שפה. הואיל וכתבי הקודש נוהגים "**לומר הרבה דברים הסוטים, לכאורה, מן האמת המוחלטת, במידה שהדבר נוגע לפשוטו של המקרא, למען התאם עצמם להבנת רוב בני האדם... נדמה, כי לא כל הכתוב חלה עליו חובת הדיוק באותה מידה שהיא חלה על כל אחת מתופעות הטבע**"; הטבע, לעומת זאת, שבתופעותיו "**האלוהים נגלה לנו... במידה לא פחותה מאשר כדברי הכתוב**", ושמוצאו "**במידה שווה מדבר האלוהים", לא יידע רחם "ואינו ניתן לשינוי ולא יעבור אף פעם את גבולות החוקים שהוטלו עליו, משום שלא איכפת לו כלל וכלל אם אמנם עקרונותיו הנסתרים ודרכי פעולתו נהירים לבני האדם ותואמים את כוח תפיסתם**".

וכך הפילוסופיה, כפי שציין גליליאו בטקסט אחר "**כתובה בספר הכביר הזה, היקום, העומד תמיד פתוח למבטנו... הוא כתוב בשפת המתמטיקה, ואותיותיו הן משולשים, מעגלים ושאר צורות הגיאומטריה**". לכן רק מומחים מסוגלים לקרוא את ספר הטבע: "**אך לא ניתן להבין את הספר קודם שמבינים את שפתו ולומדים לקרוא את האותיות שבהן נכתב**".

גליליאו הסיק מסקנות נועזות מהבדלי התכנים, השפה והיעדים בין ספר הטבע לכתבי הקודש. בהבדלים אלה עיגן את טענתו הרדיקלית, שמן ההכרח להפריד את סמכות הפילוסופים, המכירים את שפתו המתמטית של הטבע, מזו של התיאולוגים, המיומנים בפירוש כתבי הקודש. זאת ועוד, בעניינים הנוגעים לפילוסופיה של הטבע, הוא הכריז על עליונות הפילוסופים (המתמטיים) על פני התיאולוגים: "**אני סבור כי במחלוקות סביב תופעות טבעיות יש לפתוח לא בסמכות כתבי הקודש, אלא בניסיון חושי והוכחות הכרחיות", טען ב"מכתב לדוכסית הגדולה כריסטינה**".

כשהוא מצטט את אמרתו השנונה של איש כנסייה בן דורו, סיכם גליליאו את דיונו בכך שהצביע לא רק על ההבדלים בתכנים, בשפה ובקהל היעד של שני הספרים, אלא גם על ההבדלים בתכלית שלהם: "**מטרת רוח הקודש היא ללמד אותנו איך אנחנו הולכים לשמיים, ולא איך השמיים הולכים**".

קריאה קרובה בכתבי גליליאו שליוו את תגליות הטלסקופ שלו (בשנים 1616–1610) מראה שמלכתחילה לא היה קשר הכרחי בין מחויבותו לקופרניקניזם לבין פרקטיקת התצפית בשמיים אותה תיארתי. לב-ליבו של החידוש הקופרניקני – היינו הארץ הנעה – גם לא נמצא על פני השטח של הכתבים הללו, ולא במקרה.

אמנם, ב"שליח הכוכבים" הבטיח גליליאו כי: "**אנו נוכיח שהארץ היא גוף נע שאורו זוהר יותר מזה של הירח, ולא מיכל האשפה של היקום. ואנו נתמוך זאת באינסוף נימוקים הנובעים מן הטבע**" ("שליח הכוכבים"). אך הוכחה ניצחת, מוצקה ותואמת את הנורמות שהיו נהוגות בתקופתו לא נמצאה בימיו. אולם בכתיבתו התווה גליליאו אפשרויות לשינוי כלליו של השיח האסטרונומי שהיה מקובל מן היוונים ועד ימיו במסורת האסטרונומית: קודם כל באמצעות הניסוח המילולי והייצוג הפלסטי של מה שצריך שייראה למרות שאינו נראה – למשל הרי הירח, אורה ותנועתה של הארץ, וגם של מה אי אפשר שייראה – קו משונן שיקיף את הירח וייצג את שלשלות ההרים והעמקים הנמצאות עליו.

בכך הפקיע גליליאו את הנראות מן הקומונסנס והפך אותה למונופול של המדען. המדען הוא הסמכות האחרונה בהחלטה מה ניתן ומה בלתי ניתן לראייה. בעת ובעונה אחת הוא שרטט מחדש את הגבולות בין האסטרונומיה המתמטית המסורתית לפילוסופיית הטבע, ובין האסטרונומיה הפילוסופית לתיאולוגיה, וטען כי שפת הטבע היא שפה מתמטית שתיאולוגים אינם מוכשרים לחרוץ עליה משפט.

גליליאו גם לא נרתע מלנסות ולגייס לצידו את הכוח הפוליטי השולט – במקרה שלו הדוכס קוזימו דה-מדיצ'י – באמצעות הצבעה על הרלוונטיות של תגליות הטלסקופ שלו לביסוס כוחו של השליט. אין ספק שהמכלול הזה איתגר לא רק את התיאולוגיה הפילוסופית של תקופתו, אלא אף את האפשרות לכונן סינתזה חדשה בין דת ומדע על חורבות הסינתזה הסכולסטית שהתפוררה עוד לפני שהחל גליליאו לכתוב. ■

yorams@netvision.net.il

הציטוטים מובאים בתרגום "חופשי"

אברהם לייב

> "לראשונה בתולדות המין האנושי יש לנו 'מודל קוסמולוגי סטנדרטי' שמתיישב, ברמת דיוק חסרת תקדים, עם אוסף גדול של נתונים על ההיסטוריה של היקום. המודל הזה מציג ניבויים מדעיים ביחס לעתיד היקום"

עיבוד "עין החתול" שנעשה מתצפית וצילום של הטלסקופ האבל. כוכב-שמש הנמצא בתהליכי מוות, ממוקם במרחק 3000 שנות אור מאיתנו. גורל דומה צפוי לשמש שלנו.
צילום ועיבוד: (NASA, MAST, STScI, AURA and Vicent Peris (OAUV/PTeam)

והיה ב"אחרית הימים"

כאשר מרבית האנושות חייה את ההווה ומביטה לכל היותר מספר שנים קדימה, מנסים חוקרי הפיזיקה לנבא את עתיד היקום. בטלסקופים אדירי עוצמה מביטים האסטרופיזיקאים אל ראשית היקום ומנסים לחזות את עתידו. המודלים העדכניים מנבאים שבתוך חמישה מיליארד שנים תתאחד גלקסיית שביל החלב שלנו עם גלקסיית אנדרומדה. הבשורה הטובה היא שבכדור הארץ לא ממש יחושו בהתנגשות הזו

■ מדי חודש אני מקבל משכורת כמו כל שכיר אחר. להבדיל מאחרים, אני מופתע מהעובדה שמשלמים לי. אני אסטרופיזיקאי באוניברסיטת הרווארד ומשלמים לי כסף כדי שאחשוב על היקום. לכאורה, עבודה שאין לה שום השלכה מעשית. אם מהנדס טועה בחישוב חוזק החומר ממנו ייבנה הגשר, יתכן שהגשר יתמוטט ואנשים ייהרגו כתוצאה מטעותו. אם אני טועה בחישוב תנועת הכוכבים, הטעות שלי לא תשפיע בשום צורה מיידית על חיי היומיום שלנו.

האם באמת אין לאסטרופיזיקה חשיבות מעשית? המהנדס הוא הראשון שישיב בשלילה לשאלה זו. ניוטון הסיק את חוקי הפיזיקה שלו מחקר תנועת כוכבי הלכת סביב השמש. חוקים אלו הם הבסיס לתכנון הגשרים של המהנדס. תורת היחסות הכללית של אינשטיין פותחה כדי לתאר את היקום והיא הכרחית להשגת הדיוק הנדרש למערכות ניווט (GPS) שמשמשות לצרכים צבאיים ואזרחיים רבים.

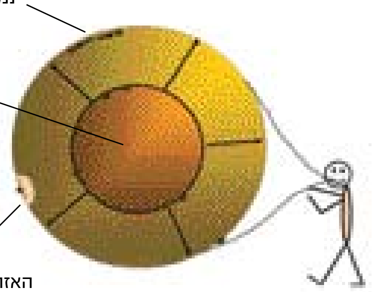
>>

<< אבל יש הקשר רחב הרבה יותר לאסטרופיזיקה. תמונת העולם שלנו, הבנת היקום שלנו, מעצבת את הדרך שבה אנו מפרשים את המציאות ומתנהגים. כיצד התחיל היקום? איך החלו החיים בו? האם הוא מתפשט? ובאיזה קצב? הצורך האנושי הבסיסי להבין את התמונה הכוללת מסביר מדוע התנ"ך מתחיל עם סיפור בריאת העולם.

התמונה הגדולה באמת כוללת את כדור הארץ שלנו, כגוש אבן שהתגבש משרידי הגז שיצר את השמש, שהיא כוכב לכת טיפוסי מבין עשרות מיליארדי כוכבים בגלקסיית שביל החלב, שהיא גלקסיה טיפוסית מבין מאות מיליארדי גלקסיות שממלאות כעת את היקום ולא היו בו בעברו הרחוק. כדי שתהיה לנו תמונת עולם מאוזנת, אנחנו חייבים להבין את היקום. אין משימה מעשית מכך.

להבנת התמונה הכוללת יש חשיבות מעשית גדולה. דוגמה טובה היא מזג האוויר. במשך דורות רבים התלוננו בני האדם על פגעי מזג האוויר באזור בו חיו. חלקם שייכו תופעות טבע הרסניות לישות אלוהית שמגיבה על מעשי האדם. בעידן המודרני יש ביכולתנו לקבל תמונות המתארות את התפתחות מזג האוויר על פני כדור הארץ. המידע המגיע מלוויינים מוזן למחשבים שמשתמשים בחוקי הפיזיקה כדי להסביר ולחזות את מזג האוויר.

במאמר שלפניכם אנסה לתאר את התחזית המדעית העדכנית לעתיד היקום. כמו בדוגמת מזג האוויר, תחזית זו מבוססת על מידע תצפיתי ועל מודל מדעי. דורות קודמים של חוקרים שאלו את עצמם לא פעם בנוגע לעתיד הרחוק של היקום, או במונחים תנ"כיים: מה התחזית ל "אחרית הימים". כיום, לראשונה בתולדות המין האנושי, יש לנו "מודל קוסמולוגי סטנדרטי" שמתיישב, ברמת דיוק חסרת תקדים, עם אוסף גדול של נתונים על ההיסטוריה של היקום. המודל הזה מציג ניבויים מדעיים ביחס לעתיד. בשורות הבאות אסכם את התחזיות של הגרסה הפשוטה ביותר של המודל הקוסמולוגי הסטנדרטי (עם קבוע קוסמולוגי שאינו משתנה בזמן ועליו נרחיב מעט בהמשך).



איור 1 – פוטונים ביקום מאיץ דומים לנמלים על בלון מתנפח
התפשטות היקום מפרידה בין הנמלים בקצב מהיר בהרבה מקצב ההליכה שלהן. תנועת הפוטונים ביקום מאיץ דומה לתנועתן של נמלים על מעטפת של בלון מתנפח. אם הקצב שבו הבלון מתנפח הולך וגדל, הנמלים יכולות לבקר באזור מצומצם בלבד על מעטפת הבלון. בדומה לכך, בגלל שהקצב בו החלל מתנפח הולך וגדל, פוטונים יכולים לבקר באזור מצומצם בלבד של היקום.

מבט לעבר – ניבוי לעתיד

בכל פעם שנשיא אמריקני נושא את הנאום השנתי על "מצב האומה" אני מדמיין מה היה קורה אילו היה מוסיף הערה לגבי "מצב היקום" שבו אנו חיים. כמובן, טבעי לחלוטין שהנשיא יתמקד בסוגיות שמשפיעות על בחירתו מחדש כעבור ארבע שנים ויתעלם מאירועים קוסמולוגיים שנמשכים ביליוני שנים. ובכל זאת נראה לי משעשע לדמיין אותו משלֵב הערה קצרה לגבי התמונה הרחבה יותר, במיוחד כיום, כשאנו מבינים הרבה יותר טוב את העתיד שלנו בקוסמוס.

כיוון שקוסמולוגים הגיעו בעשור האחרון להתקדמות משמעותית במחקרם, בואו נראה מה מגלה לנו הבנתנו החדשה את היקום על העתיד. בגלל העובדה שמהירות האור היא סופית, קוסמולוגים יכולים לצפות ישירות במראהו של היקום בעבר. האור שאנחנו רואים היום ממקור אור רחוק, מוכרח היה להיפלט בתקופה מוקדמת יותר כדי שיגיע אלינו היום. לכן, ככל שאנחנו מסתכלים עמוק יותר לתוך היקום, אנחנו יכולים לראות איך הוא נראה בתקופה מוקדמת יותר; ממש כמו בחפירה ארכיאולוגית. ואם ביכולתנו למדוד את המרחק בינינו לבין כוכבים רחוקים, הרי שנוכל להסיק כיצד השתנה קצב ההתפשטות של היקום במרוצת הזמן.

באופן טבעי היינו מצפים שהתפשטות היקום תואט עם הזמן בגלל כוח הכבידה של החומר בתוכו. האם ההשערה הזו עומדת במבחן של צפייה בטלסקופ?

דרך פשוטה לחשב את המרחק שלנו מפנס רחוב בעל נורה של מאה וואט היא למדוד כמה אורו נראה חזק בלילה. מאה הוואטים שהנורה מייצרת מתפשטים סביבה בצורה של כדור, ששטח המעטפת שלו גדל ביחס ריבועי למרחק. לכן, שֶטף הקרינה שמגיע אלינו (כלומר, האנרגיה של הקרינה ליחידת זמן ליחידת שטח) קטֵן ביחס ריבועי למרחק שלנו ממקור האור. העובדה הזו יכולה לשמש אותנו לחישוב מרחקנו ממקור האור.

למרבה המזל, כוכבים מתפוצצים מסוג מסוים (המכונים סופרנובה מסוג Ia) מספקים לנו "נורה" סטנדרטית שאפשר לראות את האור שהיא מפיצה עד קצה היקום. בעשור האחרון חישבו שתי קבוצות של חוקרים את המרחק שלנו מסופרנובות רבות. בניגוד להשערה הטבעית, הם גילו שמהירותה של ההתפשטות הקוסמית גַדלה (כלומר, ההתפשטות הואצה) בחמשת ביליוני השנים האחרונות (ראה איור מספר 1).

תורת הכבידה של אינשטיין תומכת באפשרות שהיקום מאיץ, בתנאי שצפיפות המסה של הוואקום (ריק) גדולה יותר ממחצית צפיפות המסה של החומר (וזה בדיוק מה שקורה בזמנים מאוחרים יותר, כי החומר הופך דליל יותר בגלל ההתפשטות הקוסמית בעוד שהוואקום נשאר קבוע). ואקום בלתי משתנה, או כפי שהפיזיקאים מכנים אותו הקבוע

הקוסמולוגי, יוצר אפוא כוח כבידה "דוחה", שמרחיק גלקסיות זו מזו בקצב הולך וגדל. לאור התגלית הזאת, מה יכול הנשיא לומר לאזרחיו ביחס ל"מצב היקום"?

הגלקסיות ה"אבודות"

נאמר זאת חד וחלק: מצב היקום שלנו לא נראה מזהיר עבור חוקרים שירצו להשקיף וללמוד עליו בעתיד ממערכת השמש. אם אכן שולט בהתפשטות היקום "קבוע קוסמולוגי", ואם צפיפות הוואקום תישאר קבועה בְּזמן שהיקום יזדקן פי עשר מגילו הנוכחי, כי אז כל הגלקסיות מחוץ לאזור הקרוב לנו יידחפו אל מחוץ לאופק שלנו בגלל התפשטותו המואצת של החלל. במאמר קצר שפרסמתי בשנת 2002 הנקרא "העתיד הרחוק של האסטרונומיה החוץ-גלקטית", הראיתי שלמעשה כל הגלקסיות מעבר למרחק מסוים מאינו (הסחה לאדום בערך של z = 1.8) נמצאות כבר היום מחוץ לאופק שלנו (ראה איור מספר 2).

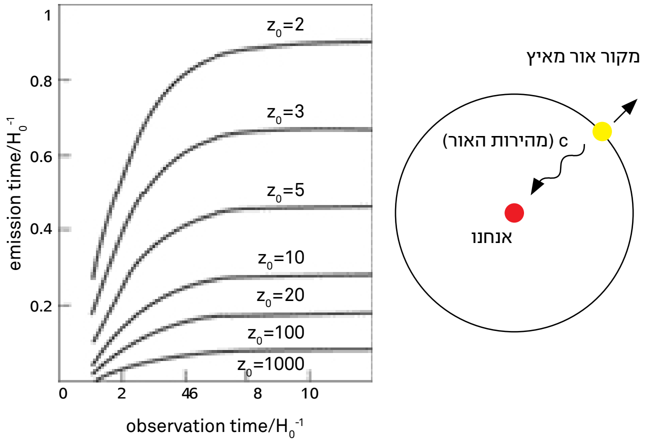
האור שאנחנו מקבלים מהגלקסיות כיום נפלט לפני זמן רב והוא אינו מייצג את מצבן הנוכחי. אם האור הזה נושא עימו הודעה מאיזו ציוויליזציה רחוקה, כל תגובה שנשלח בחזרה תֹאבד בחלל ולעולם לא תגיע ליעדה. תוך פרק-זמן סופי, התפשטותו המואצת של החלל דוחפת ומרחיקה מאיתנו כל גלקסיה רחוקה במהירות גבוהה ממהירות האור. אפילו האור אינו מסוגל אפוא לגשר על התהום הגדולה הנפערת בינינו לבין גלקסיות מרוחקות בשל התפשטותו המואצת של הקוסמוס.

> **לפי תורת היחסות הכללית, המרחב יכול להתפשט בקצב גבוה כרצוננו, בעוד שיחסית אליו התנועה של חלקיקים חומריים מוגבלת למהירות האור**

המצב דומה לצפייה בחבר שחוצה את האופק של חור שחור. ממרחק, היינו רואים את דמותו של חברנו ההרפתקני שועטת לעבר חור שחור, הולכת ונחלשת ככל שהיא מתקרבת אליו, ולבסוף קופאת כבתמונת סטילס אחרונה, כאשר אותו חבר נראה כאילו הוא מרחף ממש מעל האופק. תמונת הסטילס מייצגת את מראהו האחרון של החבר בעודו חוצה את האופק במערכת שלו. לפי תורת היחסות הכללית, מעבר לנקודה הזאת בַּזמן אי אפשר לדעת דבר על מקום הימצאו של החבר. התמונה הקפואה נשארת לנצח, אבל נחלשת בעוצמתה עם הזמן.

משום שהמראֶה של כל גלקסיה "יקפא" כתמונת סטילס כעבור פרק-זמן סופי כלשהו במערכת המנוחה שלה, המידע שאנחנו יכולים לאסוף

"התפשטותו המואצת של החלל דוחפת ומרחיקה מאיתנו כל גלקסיה רחוקה במהירות גבוהה ממהירות האור. אפילו האור אינו מסוגל אפוא לגשר על התהום הגדֵלה הנפערת בינינו לבין גלקסיות מרוחקות בשל התפשטותו המואצת של הקוסמוס"



איור 2 – העתיד הרחוק של האסטרונומיה החוץ-גלקטית:
כל הגלקסיות מעבר למרחק מסוים מאיתנו (הסחה לאדום בערך של z = 1.8) נמצאות כבר היום מחוץ לאופק שלנו (אין קליטה בטלפון הנייד כאשר z > 1.8). (Loeb 2002). ההתפשטות המואצת של החלל מרחיקה מאיתנו גלקסיות רחוקות במהירות הולכת וגדלה. כשמהירותה של גלקסיה ביחס אלינו עוברת את מהירות האור, המראֶה של אותה גלקסיה "קופא" ונמוג. מרגע זה ואילך, לא נוכל לאסוף כל מידע נוסף לגבי קורותיה של אותה גלקסיה, או לתקשר עם יושביה. הגרף משמאל מציג את הזמן שבו הגלקסיה הרחוקה פולטת אור כפונקציה של הזמן (העתידי) שבו תצפיתנים יצפו בה ממערכת השמש (מתוך Loeb 2002). הזמן מיוצג ביחידות של 14 ביליוני שנות אור (שהוא בערך גיל היקום). על כל הסחה לאדום שאנחנו מודדים למקור אור, קיים גיל מקסימלי של המקור שלא נוכל לראות אותו אחריו, גם אם נמשיך לצפות בו לנצח.

על כל גלקסיה מוגבל. בפרט, לעולם לא נוכל לחקור את התפתחותה של גלקסיה מעבר לגיל סופי מסוים. ככל שהגלקסיה רחוקה יותר, כך "יקפא" המראה שלה מוקדם יותר, ויעמוד לרשותנו פחות מידע לגבי מה שיקרה לה כשהיא תזדקן.

כמובן שמערכות שגורמיהן קשורים זה לזה באמצעות כוח משיכה הדדי חזק יותר מכוח הכבידה הדוחה של הקבוע הקוסמולוגי אינן משתתפות בהתפשטות הקוסמית. מערכות כאלה כוללות אלקטרונים שקשורים לאטומים באמצעות כוח אלקטרומגנטי, כוכבי לכת שקשורים לשמש וגלקסיות שמוחזקות כמקשה אחת בגלל שכוח הכבידה הפנימי שלהן חזק יותר מן ה"דחייה" הקוסמית.

אם כך, אֵילו גלקסיות יישארו קשורות אלינו ואילו גלקסיות יתעופפו >>

>> הרחק מאיתנו? כדי לענות על השאלה הזאת, הרצנו בשיתוף פעולה עם קן נאגאמין בשנת 2003 הדמיה ממוחשבת של התפתחותן העתידית של כל הגלקסיות הנמצאות במרחק של פחות ממאה מיליון שנות אור מגלקסיית שביל החלב. ההדמיה שלנו התבססה על נתונים מתצפיות קודמות, שתיארו את התפלגות הגלקסיות ביקום. ההדמיה הראתה שכל הגלקסיות, מחוץ לקבוצה המקומית של הגלקסיות במרחק של שלושה מיליון שנות אור מאיתנו, אינן קשורות אלינו באמצעות כוח משיכה הדדי חזק דיו, והן יידחפו אל מחוץ לשדה הראייה שלנו בגלל ההתפשטות הקוסמית (ראה איור מספר 3). הגז הבין-גלקטי יהפוך קר מאוד אבל יישאר ברובו במצב מיונן כפי שהוא כיום.

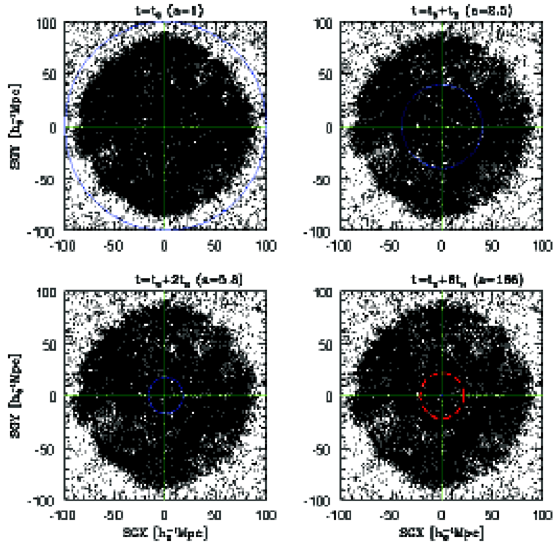
ומה יקרה בסביבתנו?

איך תיראה הקבוצה המקומית של הגלקסיות בעתיד הרחוק? שני מרכיביה העיקריים של הקבוצה המקומית, הגלקסיה שלנו (שביל החלב) וגלקסיית אנדרומדה הקרובה, נעים כעת במסלול שמוביל להתנגשות. גלקסיית אנדרומדה דומה בתכונותיה לגלקסיית שביל החלב שלנו (כאילו שהיו אחיות), ונמצאת כיום במרחק של כשני מיליון שנות אור מאיתנו.

הסחת הספקטרום של הקרינה מאנדרומדה כתוצאה מאפקט דופלר מראה שאנדרומדה ושביל החלב מתקדמות זו לקראת זו במהירות של כמאה קילומטרים לשנייה וצפויות להתמזג. בהתחשב במדידות העדכניות ביותר, ביצענו לאחרונה הדמיית מחשב של ההתנגשות בין שתי הגלקסיות, בשותפות עם האסטרופיזיקאי טי ג'יי קוקס. הגלקסיה שתיווצר כתוצאה מהמיזוג תכיל את החומר שהגיע משתי גלקסיות האם ותהיה בגודל כפול מגלקסיית שביל החלב היום (ראה צילום מספר 4).

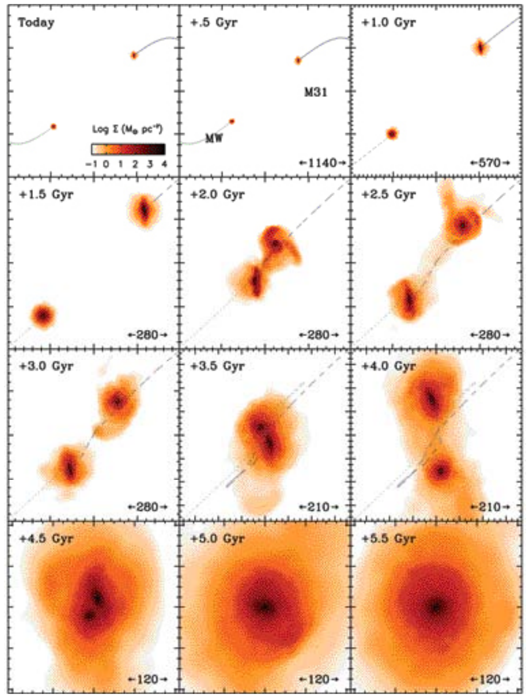
בהתאם לפרמטרים הסבירים ביותר של הקבוצה המקומית, מצאנו שהמיזוג בין אנדרומדה לבין שביל החלב יתרחש בתוך מספר ביליוני שנים. משום שהשמש צפויה להמשיך לחיות שנים רבות יותר, אפשר יהיה לצפות בָּאירוע הזה, באופן עקרוני, מתוך מערכת השמש. יחד עם קוקס, עשינו הדמיה לַמיזוג העתידי הזה ובחנו מה יקרה במהלכו לשמש. מתברר שהשמש תיזרק עד נקודה רחוקה פי כמה מן המרחק שמפריד כרגע בינה לבין מרכז שביל החלב (ראה איור מספר 5).

במהלך המיזוג, עשוי שביל החלב להיראות כגלקסיה חיצונית למשקיפים ממערכת השמש. בנוסף לכך, ישתנה מראה השמיים בלילה. כיום, הדיסקה השטוחה של שביל החלב שבה אנו חיים נראית כרצועה

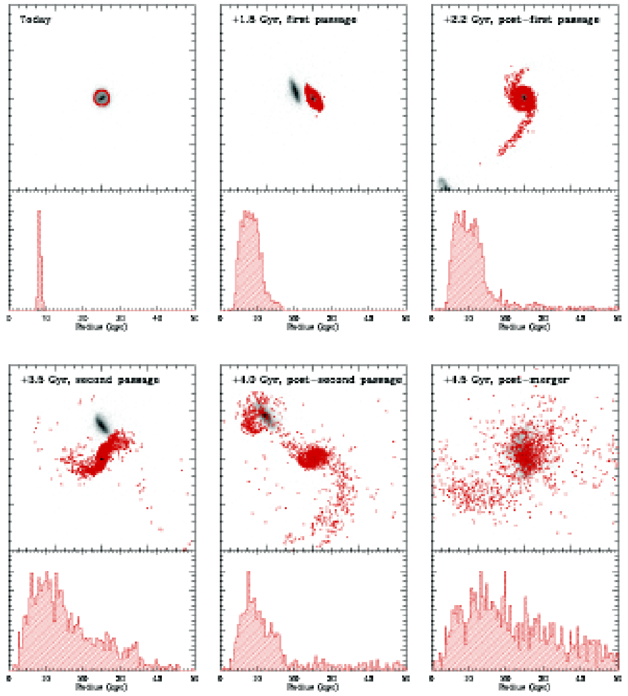


איור 3 – התפתחותן העתידית של הגלקסיות בסביבה של גלקסיית שביל החלב (מתוך Nagamine & Loeb 2003): התמונות מוצגות במערכת קואורדינטות שמתפשטות יחד עם היקום (הפיזיקאים מכנים אותן קואורדינטות נעות). התרשים מציג, החל בתמונה השמאלית העליונה וכלה בתמונה הימנית התחתונה, את התפלגות הגלקסיות בשכבה שעובייה מאה מיליוני שנות אור, כפי שהיא נראית בזמנים שונים: כאשר הוא הזמן הנוכחי ו-שווה ל-14 ביליוני שנות אור. בכל התמונות מייצג המעגל הכחול כדור ברדיוס של כ-500 מיליוני שנות אור. בתמונה הימנית התחתונה, היקום התפשט במידה כזאת, שכדור בגודל כזה הינו בלתי נראה. במקומו מוצג באמצעות מעגל אדום מקווקו האופק שלנו ברדיוס של 14 ביליוני שנות אור.

איור 4 – ארבעה צילומים של הגלקסיה הקרובה הגדולה ביותר, אנדרומדה, המתקדמת לעבר גלקסיית שביל החלב במסלול שמוביל להתנגשות (המקור: גוּהאטאקוּרטה, אוניברסיטת קליפורניה, סנטה קרוז): בתוך מספר ביליוני שנים, הגלקסיות ינועו קרוב מאוד זו לזו; ובתוך חמישה ביליוני שנים, לפני שהשמש תמות, הן יתמזגו ויהפכו לגלקסיה אחת. במפגש הראשון ביניהן, אנדרומדה תיראה בשמיים גדולה כמו שביל החלב.



איור 5 – כאשר היקום יזדקן פי עשר מגילו הנוכחי, נראה בשמי הלילה את תוצאת המיזוג בין גלקסיית שביל החלב (MW) לבין שכנתה הקרובה ביותר, גלקסיית אנדרומדה (A). התמונות מציגות את התחזית להתפתחותה של ההתנגשות העתידית הזו (מתוך Cox & Loeb 2007): גוני הצבע האדום מציגים את הצפיפות של הכוכבים בַּמרחב, ואת השתנותה בַּזמן. אנדרומדה היא הגדולה יותר מבין שתי הגלקסיות והיא מתחילה את מסלולה בחלק הימני העליון של התמונה. גלקסיית שביל החלב מתחילה את מסלולה בקצה השמאלי התחתון של התמונה. קנה המידה של כל תמונה מוצג בקצה הימני התחתון שלה ביחידות של 3,000 שנות אור. זמן ההדמיה, בביליוני שנים מהיום, מוצג בחלק השמאלי העליון של כל תמונה. המסלולים של שביל החלב ושל אנדרומדה מתוארים באמצעות קווים כחולים.



איור 6 – מיקומה המשוער של השמש בשלבים שונים של המיזוג בין גלקסיית שביל החלב לבין גלקסיית אנדרומדה (מתוך Cox & Loeb 2007): החלק העליון של הלוח מציג באמצעות נקודות אדומות את כל הכוכבים שמרחקם ממרכז גלקסיית שביל החלב זהה למרחקה של השמש משם, ועוקב אחר מיקומם בעתיד. החלק התחתון של הלוח מציג היסטוגרמה של מרחקם ממרכז שביל החלב.

של כוכבים בשמיים. כוכבים אלה יתפזרו בגלל המיזוג שלהם עם אנדרומדה וההתפלגות שלהם בשמיים תלבש צורה יותר כדורית. המיזוג שיתרחש בגלל ההתנגשות בין שביל החלב לבין אנדרומדה ייצור גלקסיה חדשה, שכיניתי אותה ב 2007 בשם "מילקוֹמדה" [Milkomeda]. הצורה הכדורית של מילקומדה אינה חריגה, שכן היא מאפיינת קבוצה נפוצה של גלקסיות המכונות "גלקסיות אליפטיות". כנראה שרוב הגלקסיות האלו ביקום הנוכחי שלנו נוצרו מהתנגשויות בין גלקסיות דיסקה בתקופות קוסמיות מוקדמות יותר. בסופו של דבר, האסטרונומים של העתיד במערכת השמש יוכלו לראות רק את מילקומדה (ראה איור מספר 6). הנוף סביבנו ישתנה, אבל החיים במערכת השמש שלנו לא יופרעו במהלך ההתנגשות בין הגלקסיות. המרחק בין הכוכבים גדול מאוד וההסתברות שנפגוש כוכב מאנדרומה הינה נמוכה ביותר.

אם כך, מעניין לשאול את השאלה ההיפותטית הבאה: נניח שכל הארכיונים המדעיים יאבדו בגלל קטסטרופה קוסמית כלשהי. במקרה כזה, האם אסטרונומים עתידיים יצליחו לחשוף את העובדה שמילקומדה נוצרה מהמפץ הגדול, ולא יגיעו להיפותזה אחרת, למשל שמילקומדה היא גלקסיית אִי [island galaxy], אשר היתה מוקפת בוואקום במשך תקופה ארוכה?

התפשטותו המואצת של היקום הופכת את חקר הקוסמולוגיה לאפיזודה חולפת במאמץ המדעי ארוך הטווח שלנו. מוטב שנִצפה בַּיקום בעשרות ביליוני השנים הקרובות ונתעד את הממצאים שלנו לטובת מדעני העתיד, כי אלה לא יוכלו לעשות תצפיות כאלו בעצמם. יהיה סביר להשקיע את קרנות המחקר בתצפיות קוסמולוגיות במרוצת עשרות ביליוני השנים הקרובות, לפני שמחקרים מסוג זה יהפכו לבלתי אפשריים. מרגע שתצפיות קוסמולוגיות יהפכו חסרות טעם, ניתן יהיה לקחת את הכספים משדה המחקר הזה ולהשקיע אותם בפתרון הבעיות הפוליטיות המקומיות שלנו. בעת ההיא, התעלמותו של הנשיא בנאומו על "מצב האומה" ממצבו (הריק) של היקום שלנו תהיה מוצדקת לחלוטין ■

aloeb@cfa.harvard.edu

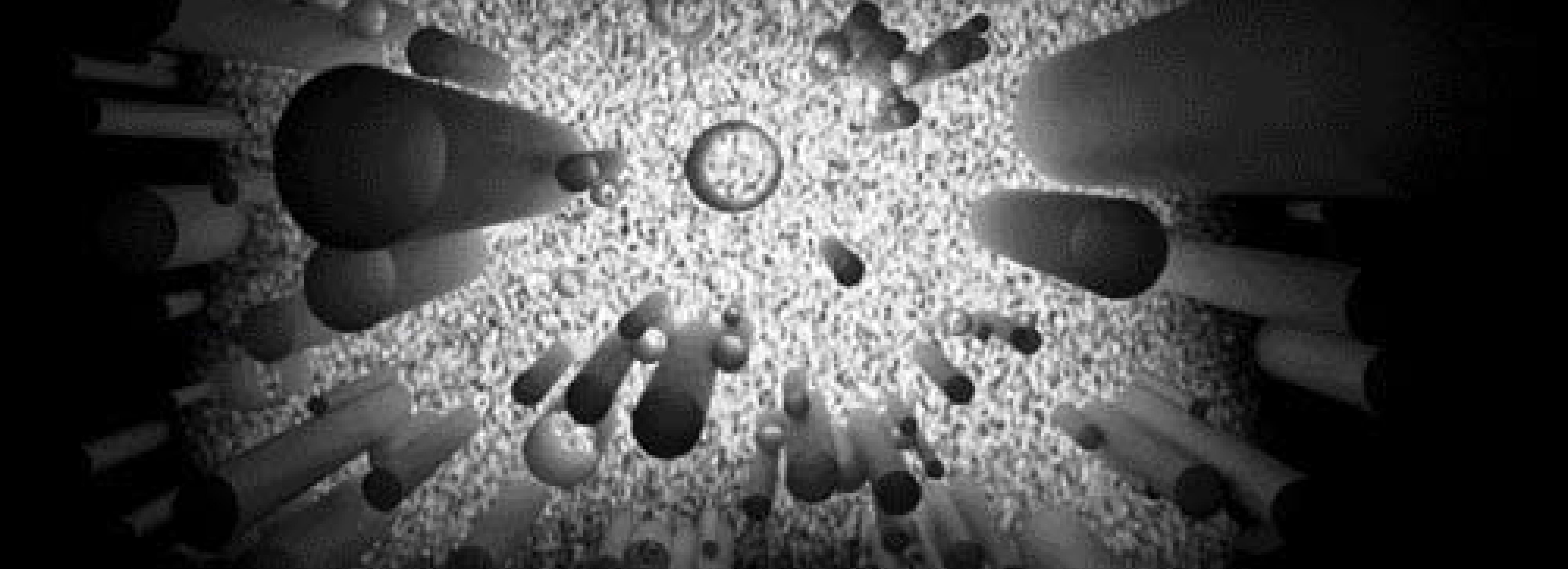
מריו ליביו / דימויים: יאן טיכי

שודקים באפלה

רוב היקום שלנו לא מורכב מאטומים או חומר אחר המוכר לנו. החלק הארי של היקום, כ־72 אחוזים, מורכב מ"אנרגיה אפלה", צורה מסתורית של אנרגיה שעל מהותה כמעט איננו יודעים דבר. 400 שנה אחרי שגליליאו החל לצפות בחלל באמצעות טלסקופ, מחפשים האסטרונומים תיאוריה שתסביר מהי אנרגיה אפלה זו ותפענח את טבע היקום ועתידו

<<

"התיאוריה הקיימת הטובה ביותר להסבר ההאצה הלא־צפויה של היקום מניחה את קיומה של אנרגיה אפלה, צורת אנרגיה שצפיפותה כמעט קבועה, או אף קבועה לחלוטין, במרחב ובזמן. ההתמדה של האנרגיה האפלה מספקת ליקום כוח דחייה קבוע (הפועל בניגוד לכוח הכבידה). האנרגיה הזו מאיצה את התפשטות היקום"



מתוך מיצב מס. 7 (Tubes), 2009, מייצב וידאו וסאונד, מוניטור ואוביקט נייר, יאן טיכי.

■ בסוף המאה ה-20 התבררה תופעה מפתיעה ומוזרה. הרכב היקום שלנו שונה מהותית ממה ששיערנו. רק כ־5% מכלל החומר והאנרגיה ביקום עשויים מחומר שמוכר לנו - כלומר, אותם סוגי חלקיקים שיוצרים את הכוכבים, את הפלנטות ואת בני האדם. כ־ 23% של היקום מוגדרים כ"חומר אפל". אנחנו לא יודעים ממה מורכב חומר זה. יש יסוד להניח שמדובר בחלקיקים תת־אטומיים מסוג כזה או אחר, שעדיין לא התגלו במעבדות שלנו. כוחות הכבידה של החומר האפל הם אלו שמדביקים ומחזיקים את הגלקסיות.

זה עוד לא הכל. רוב היקום, כ־72 האחוזים הנותרים, מורכב מצורה מסתורית עוד יותר, המכונה "**אנרגיה אפלה**". למרות שאיננו יכולים לראות אותה, אנו מסיקים את קיומה מתצפיות מדויקות שנעשו לאחרונה. האנרגיה האפלה היא זו שמאיצה את התפשטות היקום.

מהי אנרגיה אפלה זו? אנו יודעים כי צפיפותה כמעט קבועה ביחס למרחב ולזמן, אבל מעבר לכך איננו יודעים באמת מה טיבה. הבנת טבע האנרגיה האפלה הזאת היא אחד האתגרים החשובים, אם לא האתגר החשוב ביותר, של הפיזיקה והאסטרונומיה בתקופתנו.

התפשטות קוסמית

היקום הנצפה מכיל מאות מיליארדי גלקסיות. הוא עצום בממדיו וממשיך עדיין להתפשט. כלומר, הולך וגדל בקצב מואץ. אטומים, בני אדם או אפילו גלקסיות אינם מתפשטים, אלא נשארים בגודל קבוע, כמובן (ואם אנחנו תופחים, הסיבה, לפחות, איננה קוסמולוגית). לעומת זאת, המרחב בין גלקסיות מתמתח וגדל במרוצת הזמן.

בעבר היה מקובל להניח שכוח המשיכה הפועל בין מסות שונות, יאט בהדרגה את ההתפשטות הקוסמית. כלומר, שהמשיכה ההדדית בין הגלקסיות תגרום להאטת ההתפשטות. לכן ההלם בקרב קהילת הפיזיקאים היה כה גדול, כאשר ב־1998 שני צוותים של אסטרונומים שפעלו באופן בלתי תלוי זה בזה, הודיעו כי התפשטות היקום לא רק שאינה מואטת, אלא דווקא מואצת. שתי הקבוצות הסתמכו על כוכבים מתפוצצים מסוימים שנקראים סופרנובות מטיפוס Ia (ראו צילום 1). התפוצצויות אלה זוהרות עד כדי כך, שאפשר לראותן ממרחק מיליארדי שנות אור. והנה, בתצפית כזאת התברר כי הסופרנובות האמורות רחוקות מהמקומות בהם הן היו צריכות להימצא על־פי הנחת העבודה, שהיקום מאט את התפשטותו או אפילו מתפשט במהירות קבועה. המסקנה היתה ברורה: היקום מאיץ ולא מאט את התפשטותו.

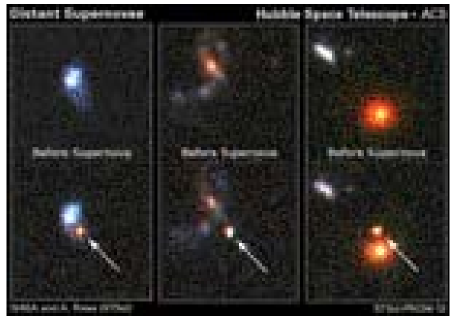
אור שנפלט מעצם שנמצא במרחק של ארבעה מיליארד שנות אור מאיתנו, למשל, מגיע לעינינו או לטלסקופים שלנו ארבעה מיליארד שנים לאחר צאתו לדרך. במילים אחרות, כאשר אנו צופים באור כזה, אנו מסתכלים ביקום כפי שהיה לפני ארבעה מיליארד שנים

התופעה הזו חייבה הסבר שישתלב עם הפיזיקה שלנו, ובמיוחד עם תורת היחסות הכללית. התיאוריה הקיימת הטובה ביותר להסבר ההאצה הלא־צפויה של היקום מניחה את קיומה של **אנרגיה אפלה**, צורת אנרגיה שכאמור, צפיפותה כמעט קבועה, או אף קבועה לחלוטין, במרחב ובזמן. התמדה של האנרגיה האפלה מספקת ליקום כוח דחייה קבוע (הפועל בניגוד לכוח הכבידה). אך מהי אנרגיה זו ואיך היא פועלת ומשפיעה על ההאצה של התפשטות היקום?

אנרגיית ואקום?

אחד ההסברים הרווחים היום על טבע האנרגיה האפלה הוא, שזו **אנרגיית ואקום**, אנרגיה שמצויה במרחב ריק, והיא אחידה באופן מושלם בכל מקום ביקום. ראשיתו של רעיון זה באלברט אינשטיין, שהכניס לתורת היחסות הכללית שלו, ב־1917, את מושג "הקבוע הקוסמולוגי". באותו זמן חשבו האסטרונומים שהיקום אינו מתפשט ואינו קורס. כדי להסביר מצב יציב זה של היקום הציג אינשטיין את אלמנט הדחייה שמחולל "הקבוע הקוסמולוגי" כגורם שמאזן את אלמנט המשיכה של החומר. תיאוריה זו לא החזיקה מעמד זמן רב. מרגע שאדווין האבל גילה את התפשטות היקום ב־1929, היה ברור לאינשטיין כי שוב אין צורך ב"קבוע הקוסמולוגי", והוא נטש את המושג הזה ואפילו קרא לו (לדברי הפיזיקאי ג'ורג' גאמוב) "הטעות הגדולה ביותר" שלו.

עכשיו חוזרים הפיזיקאים אל "הקבוע הקוסמולוגי" בצורת אנרגיה אפלה או אנרגיית ואקום. ההשערה היא שאנרגיה כזו אינה גז או נוזל. היא גם אינה חומר אחר, במובן האינטואיטיבי של המילה. אנרגיית ואקום היא תכונה של הזמן־מרחב עצמו. מדובר בכמות מזערית של אנרגיה שמצויה בכל קטע של מרחב; האנרגיה שנשארת לאחר ש"יוצרים ואקום" או ריק - כלומר, מרחיקים מאותו אזור כל סוג של "חומר". על־פי תורת היחסות הכללית, כמות האנרגיה הזאת יכולה להיות חיובית או שלילית, ואין שום סיבה מיוחדת שמחייבת את התאפסותה.



צילום 1:
תמונותיהן של שלוש מהסופרנובות הרחוקות ביותר הידועות לנו, שהתגלו באמצעות טלסקופ החלל "האבל". הכוכבים התפוצצו בעבר הרחוק, כאשר גיל היקום היה שווה בקירוב למחצית גילו הנוכחי. האור שנפלט אז מגיע רק עכשיו לכדור הארץ. הסופרנובות בהירות עד כדי כך, שאפשר לראותן ממרחק רב. כך ניתנת לאסטרונומים אפשרות לעקוב אחר מהירות ההתפשטות של היקום ולקבוע, איך היא מושפעת על־ידי כוח הדחייה של האנרגיה האפלה.

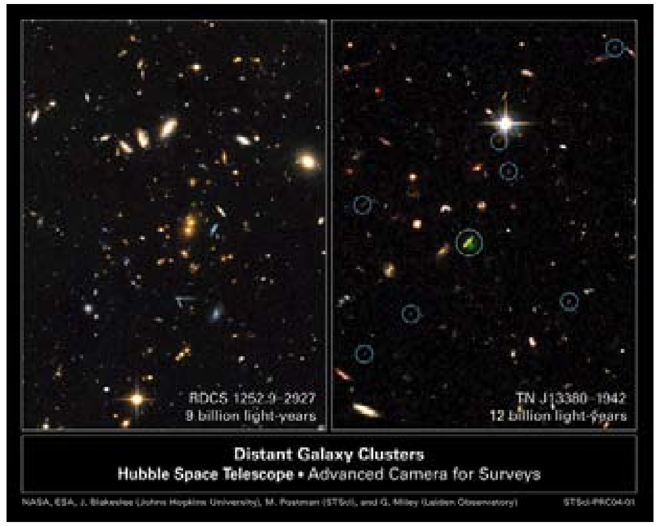
העולם המיקרוסקופי מציית לחוקי מכניקת הקוונטים, שקובעים כי הבנת המצב של כל מערכת כרוכה באי־וודאות בלתי נמנעת (בהתאם לעקרון אי־הוודאות של ורנר הייזנברג). לכן איננו יכולים לקבוע כי האנרגיה של מרחב ריק היא אפס. שדות אנרגיה נתונים בתנודות אפילו במרחב ריק שכזה. ב"תנודות הוואקום" האלה **חלקיקים וירטואליים** צצים מדי פעם, ואז שבים ונעלמים. אותם חלקיקים וירטואליים אינם המחולל היחיד של אנרגיה זו. הם תורמים לאנרגיית הוואקום, אבל תורת היחסות הכללית מאפשרת קיום של אנרגיית ואקום שרירותית, גם בלי להביא בחשבון את התנודות הללו ואת הימצאותם בפועל של חלקיקים וירטואליים.

אם האנרגיה האפלה הנצפית היא באמת אנרגיית ואקום, הרי שצפיפותה קטנה מאוד - שיעורה בתוך הנפח של כדור הארץ אינו עולה על צריכת החשמל השנתית הממוצעת של אזרח במדינת ישראל. למעשה, הניחוש התיאורטי הנאיבי ביותר לצפיפות האנרגיה האפלה מחטיא את הערך הנצפה בפועל בכ־120 סדרי גודל! כמובן שזה מעיד על כך שקיים כאן משהו יסודי ביחס לאנרגיה האפלה, שהפיזיקה שלנו איננה יודעת עדיין להסביר.

מכיוון שכמותה של אנרגיית הוואקום זעירה מאוד, קל יותר להמציא תיאוריה שמצמצמת אותה לאפס מאשר לפתח תיאוריה שדוחקת אותה בדיוק לערך הנצפה. על־פי השערה אחרת, האנרגיה האפלה, כפי שהוסקה מתצפיות, איננה אנרגיית ואקום, אלא צורה חלקה דינמית, כזאת או אחרת, שמתפתחת לאט.

חֲמֶשֶׁת?

בהקשר זה הועלו מספר תיאוריות, למרות שאף אחת מהן אינה נראית טבעית לחלוטין. מועמדת פופולרית אחת טוענת שהאנרגיה האפלה מייצגת שדה מסוים, הדומה לשדה האלקטרומגנטי ולשדה הכבידתי. מכיוון ששדה זה ממלא את כל המרחב ביקום, ניתן לו השם "חמשת" (QUINTESSENCE), בדומה ליסוד החמישי שהיה אמור למלא את כל היקום על־פי הפילוסופיה העתיקה. התיאוריה מניחה שחוזקו של השדה הזה יורד עם התפשטות היקום, והסיבה לכך שערכו ביקום כל־כך נמוך היום, היא פשוט העובדה שהיקום שלנו "זקן" מאוד (בן 13.7 מיליארד שנים).



צילום 2:
מספר צבירי הגלקסיות כפונקציה של המרחק, והמסות של הצבירים האלה, מושפעים על־ידי מהירות ההתפשטות של היקום, וממילא על־ידי התכונות של האנרגיה האפלה. מחקר האבולוציה של הצבירים האלה מספק אפוא שיטה בלתי תלויה בסופרנובות למחקר טבעה של האנרגיה האפלה.

בתיאוריית "היקום התופח" (Inflationary Universe) ההנחה היא, ששדה דמוי־חמשת כזה פעל גם כשהיקום היה בן שבריר של שנייה. אותו שדה גרם לתפיחה עצומה בממדי היקום הבראשיתי, והאנרגיה שלו יצרה את כל החומר והקרינה ביקום.

הקביעה אם האנרגיה האפלה היא דינמית כמו חמשת, או קבועה בזמן כמו אנרגיית ואקום, היא יעד ראשון במעלה של הקוסמולוגיה העכשווית. האבולוציה של האנרגיה האפלה משפיעה במישרין על הבנתנו את ההתפשטות הקוסמית. הקוסמולוגים מתאמצים למפות את תולדות ההתפשטות בזהירות רבה ככל האפשר. הבנת האנרגיה האפלה הכרחית להבנת ההתפשטות. אילוצים שמוטלים על האבולוציה של האנרגיה >>

"התפשטות מואצת וקיפאון, התכנסות חזרה לנקודה אחת או התפשטות התלויה בגיאומטריה - אלה שלוש התחזיות שמחקר היקום העדכני מציג לנו. כולן קשורות לאופי ולטבע האנרגיה האפלה. הסיבוכים שמתחייבים מנוכחות של אנרגיה אפלה הם כאלה, שביסודו של דבר הם אינם מאפשרים לקבוע את גודלו של היקום על סמך תצפיות בלבד"

>> האפלה מוגדרים במקרים רבים במונחי "פרמטר של משוואת מצב", שסימנו w והוא מנת החילוק של לחץ האנרגיה האפלה בצפיפות שלה. במילים אחרות, w הוא מדד של ה"חוזק" או "כוח הדחייה" של האנרגיה האפלה. אם האנרגיה האפלה היא אנרגיית ואקום טהורה ולא משתנה, התוצאה של מדידת w צריכה לתת ערך השווה בדיוק ל1–. כלומר, אם תצפיות בעתיד יראו שהערך של w הוא בדיוק 1– ואינו משתנה בזמן, זאת תהיה ההוכחה לכך שהאנרגיה האפלה היא אמנם אנרגיית הוואקום.

אחת השיטות המתבקשות למדידת הערך של w היא להמשיך לצפות בסופרנובות מטיפוס Ia, אבל במספרים גדולים יותר (של סופרנובות) ובדיוק גבוה יותר. מדידות עתידיות של קרינת הרקע בגלי מיקרו ושל תנודות אקוסטיות של בַּריונים (חומר "נורמלי") – תנודות בהתפלגות של חומר רגיל שמתגלות במבנה של היקום בקנה מידה גדול – יבהירו גם הן את טבעה ומהותה של האנרגיה האפלה.

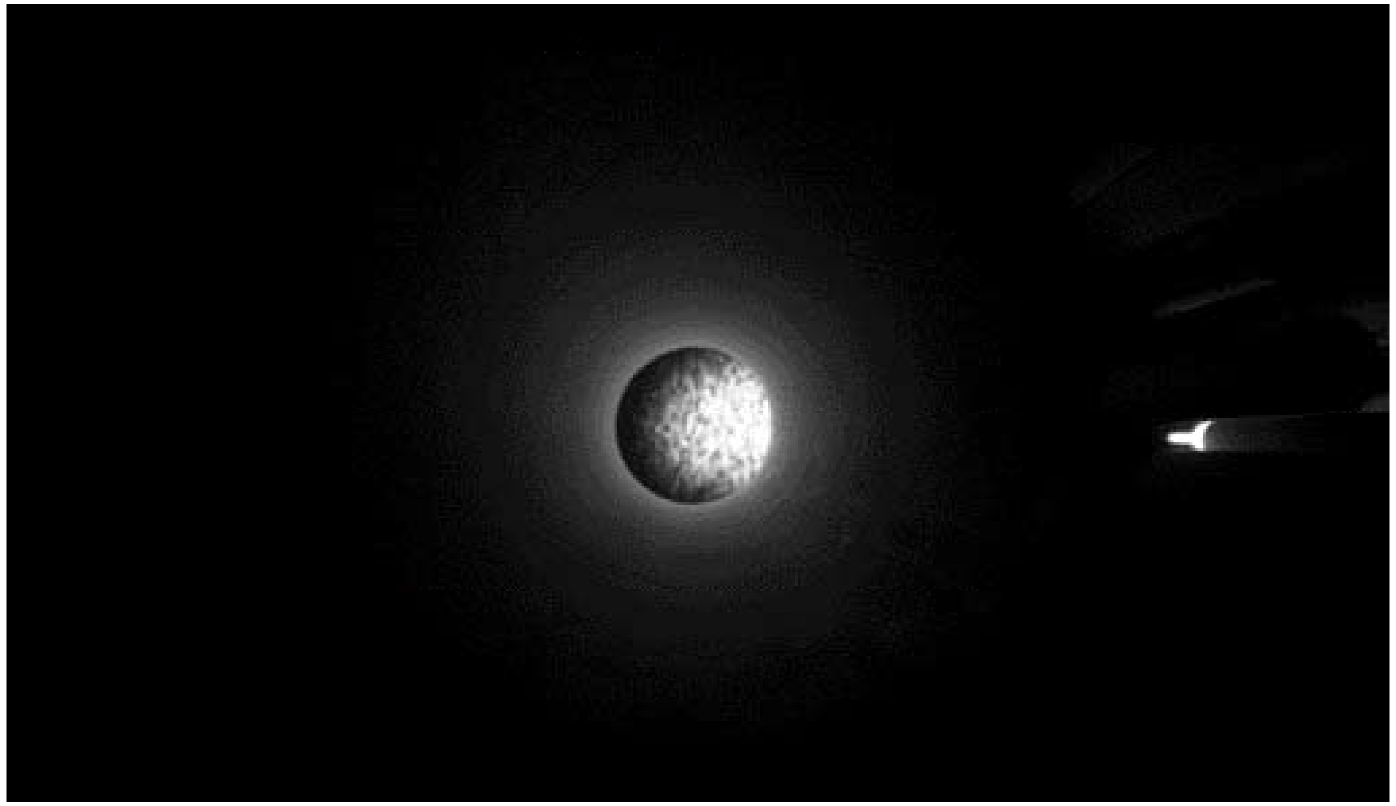
הקוסמולוגים מקווים להשתמש גם במספר ובאבולוציה של צבירי גלקסיות (צילום 2) כבוחנים רגישים של אופי ההתפשטות הקוסמית. המסה של הצבירים נקבעת באמצעות מדידת הטמפרטורה של הגז החם המצטבר בהם. כל השיטות השונות האלה יספקו בוודאי בשנים הבאות שפע של נתונים על ההתפשטות הקוסמית ועל האנרגיה האפלה.

מובן כי תיאוריה טובה על התפשטות היקום היא מנבא טוב גם לעתידו. מאז 1998 אנו יודעים שהיקום מתפשט בקצב מואץ. אבל האם האצה זו תימשך לעד? ואם כך יהיה, מה יעלה בגורלם של צבירי הגלקסיות, של הגלקסיות עצמן ושל הכוכבים? התשובות על השאלות האלה תלויות במשחק גומלין מורכב בין הגיאומטריה של היקום ובין התכונות של אותה צורת אנרגיה חלקה, שמכונה אנרגיה אפלה. הבה נבחן כמה אופציות:

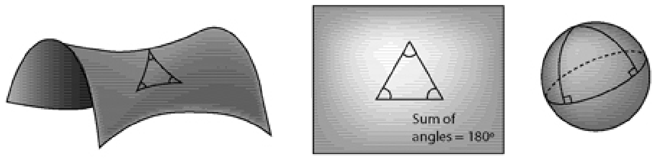
תפקידה של הגיאומטריה

תורת היחסות הכללית מלמדת אותנו שגורלו הסופי של היקום בקוסמוס **בלי אנרגיה אפלה** נקבע מראש ובאופן חד־משמעי על־ידי הגיאומטריה שלו (איור 3). יקום שעקמומיותו חיובית, כמו שטח פנים של כדור (ונקרא יקום **סגור**), יקרוס בסופו של דבר אל תוך עצמו. יקום שהגיאומטריה שלו שטוחה (**אאוקלידית**), או שעקמומיותו שלילית, כמו שטח פנים של אוכף, (והוא יקום **פתוח**), מתפשט אינסופית.

קיומה של אנרגיה אפלה מסבך את המצב במידה ניכרת. אם האנרגיה האפלה היא, כפי שהצענו קודם, אנרגיה שיש לה צפיפות קבועה והיא נקשרת עם הוואקום הפיזיקלי (אפשרות שתצפיות חדשות בסופרנובות, בצבירי גלקסיות ובקרינת הרקע לא סתרו אותה עד כה), ומנגד, צפיפויות



מתוך מיצב מס. 7 (Tubes), 2009, מייצב וידיאו וסאונד, מוניטור ואובייקט נייר, יאן טיכי.



סכום הזוויות גדול מ־ 180°

סכום הזוויות 180°

סכום הזוויות קטן מ־ 180°

[איור] 3
בהעדר אנרגיה אפלה, גורלו של יקום מתפשט נקבע על־ידי הגיאומטריה שלו. יקום שעקמומיותו דומה לזו של שטח פני כדור, קורס בסופו של דבר. יקום שהגיאומטריה שלו שטוחה, או יקום שעקמומיותו היא כמו זו של שטח פני אוכף, מתפשט לעד.

האנרגיה גם של החומר ביקום וגם של הקרינה יורדות ברציפות בעת שהיקום מתפשט, התוצאה ברורה: כאשר היקום נעשה גדול די הצורך, האנרגיה האפלה מתחילה לשלוט בכיפה. כאשר מדובר בפרמטר משוואת מצב w = 1–, שמאפיין ואקום, התוצאה היא השתלטות של האנרגיה האפלה בלי שום קשר למצבה של העקמומיות הגיאומטרית. מכיוון שאנרגיה אפלה יוצרת כוח דוחה כבידה, ההתפשטות הקוסמית מואצת, כפי שנצפה היום ביקום שלנו.

פירוש הדבר שאם התפשטות היקום שלנו נשלטת על־ידי אנרגיית הוואקום, האצתה תימשך ותוליך בסופו של דבר לכך שהאור מכל הגלקסיות מעבר לקבוצת הגלקסיות המקומית יוסח לאדום במידה כזאת, ששוב לא יהיה אפשר לעקוב אחריהן. לאמיתו של דבר, בידוד קוסמי כזה שסופו מוות ב"קיפאון גדול", אינו התסריט הגרוע ביותר ביחס לגורלו של היקום.

כשקרינה אלקטרומגנטית נפלטת מגוף, כוכב לצורך העניין, היא עוברת הסחה לפי המהירות היחסית בין הגוף למכשיר שקולט אותה. התופעה דומה לאפקט דופלר. בפשטות, כאשר גוף ומקלט מתרחקים אחד ביחס לשני, אורך הגל של הקרינה מתארך (התדר קטן), והוא עובר הסחה לאדום (red shift). באופן דומה, כשהם נעים אחד בכיוון השני, הגל עובר הסחה לכחול. כך ניתן לבדוק אם גוף מתרחק או מתקרב

"הקריעה הגדולה" או: מה יהיה גורלנו?

אם האנרגיה האפלה אינה "האנרגיה של הוואקום", ולעומת זאת היא קשורה בשדה "חמשת" מסוג כזה או אחר ומתאפיינת בפרמטר של משוואת מצב w שהוא **קטן** (שלילי יותר) מ1–, צפיפות האנרגיה האפלה תגדל עם הזמן. במקרה זה, מרגע שצפיפות האנרגיה האפלה תעלה על הצפיפות של צבירי הגלקסיות, הצבירים האלה ייקרעו לגזרים. אותו גורל צפוי לכוכבים, לפלנטות וגם לנו, בני האדם. שום מבנה לא ישרוד בתוך הצפיפות הגדלה בהתמדה של האנרגיה האפלה. קץ היקום יתחולל במה שמכונה "קריעה גדולה".

אפשרויות קיצוניות פחות נקשרות באנרגיה אפלה שאינה ואקום, אלא קיימת בצורת השדה דמוי־החמשת שבו w **גדול** (שלילי פחות) מ־1–. בדרך־כלל שדה זה צפוי לגלגל את האנרגיה הפוטנציאלית שלו כלפי מטה עד נקודת המינימום של הפוטנציאל, כשם שגולה המתגלגלת במורד הדופן של קערת סלט תגיע למנוחה, בסופו של דבר, בתחתית הקערה. במקרה זה גורל היקום תלוי בערכו של אותו מינימום. ביקום כמו זה שלנו, כל ערך **חיובי** של אנרגיית המינימום יחולל התפשטות מואצת, והיקום יגיע לאותה תוצאה של התפשטות מואצת כמו במקרה של אנרגיית הוואקום.

מינימום של אנרגיה פוטנציאלית ששווה בדיוק **לאפס**, יבטיח שהחומר המוכר לנו יתחיל לשוב ולשלוט בכיפה בשלב מסוים, ואז תתחיל האטה בהתפשטות היקום. במקרה זה, הגיאומטריה של היקום היא שתקבע את גורלו, בדיוק כפי שהערכנו שיהיה במקרה של יקום בלי אנרגיה אפלה. לבסוף, אם המינימום של האנרגיה הפוטנציאלית הוא שלילי, תתחולל ברבות הימים קריסה חוזרת של היקום, בלי שום קשר לגיאומטריה שלו.

האפשרויות הן, אם כן: התפשטות מואצת וקיפאון, התכנסות חזרה לנקודה אחת או התפשטות התלויה בגיאומטריה. אלה שלוש התחזיות שמחקר היקום העדכני מציג לנו. כולן קשורות לאופי ולטבע האנרגיה האפלה. הסיבוכים שמתחייבים מנוכחות של אנרגיה אפלה הם כאלה, שביסודו של דבר הם אינם מאפשרים לקבוע את גורלו של היקום על סמך תצפיות בלבד.

למשל, נתאר לעצמנו כי הצפיפות של האנרגיה האפלה ביקום הנוכחי שלנו היא רק טריליונית אחת של צפיפות החומר – הרבה סדרי גודל מתחת לכל אפשרות של גילוי באמצעים שבידינו. ועדיין, לאחר שהיקום שלנו יתפשט פי – 10,000, האנרגיה האפלה תיעשה לצורת האנרגיה השלטת – והיא זו שתחתום את גורל היקום. כיוון שכך לא נוכל לדעת בוודאות את גורל היקום שלנו, כל עוד לא נשלים את תוצאות התצפיות בתיאוריה מהימנה ומוצלחת, שתאפשר לנו להבין את טבעה ואת תכונותיה המדויקות של האנרגיה האפלה.

וצריך לשים לב לבעיה נוספת שקשורה לנושא, שעסקתי בו גם בספרי "שפת הסימטריה". הרכבו של היקום – 5% חומר נורמלי (בַּריוני), 23% חומר אפל ו־72% אנרגיה אפלה – נראה שרירותי לגמרי. תיאוריות טובות ומצליחות הן בדרך־כלל פשוטות וסימטריות. משום כך, יש פיזיקאים שחושבים כי כל התפיסות האמורות מוטעות לגמרי. אולי אין בכלל אנרגיה אפלה, ותיאוריית הכבידה שלנו, תורת היחסות הכללית של אינשטיין, פשוט אינה תופסת בסקאלות קוסמולוגיות? על בסיס התחושות הללו כבר הוצעו כמה תיאוריות כבידה חלופיות. עד עתה אין תצפיות או ניסויים שמספקים רמזים לאי־תקפותה של תורת היחסות הכללית, אבל ניסיון העבר מלמד אותנו לצפות תמיד ללא־צפוי.

400 שנה אחרי שגליליאו גליליי הפנה בפעם הראשונה טלסקופ אל השמיים והחל לזהות כוכבים וירחים, 19 שנה מאז שוגר הטלסקופ "האבל" לחלל והחל לצפות במרחבי היקום, אנו ממשיכים לנסות ולפתור את חידות היקום ואת עתידו. גילוי האנרגיה האפלה והבנת מהותה יהיו שלב חשוב במסע החיפוש שלנו. ■

mlivio@stsci.edu

מיכל קציר

זמן

העבודה "טווילה" היא פורטרט שנוצר מ–36 פריימים שצולמו בנפרד. הפריימים לא התקיימו בו זמנית, והחיבור הסופי ביניהם יוצר את הדמות. חומרי הגלם הם חומרים פשוטים הקיימים בכל בית

■ **"העבר אין / העתיד עדיין / ההווה כהרף עין / אם כן דאגה מניין?"** – נחמה פורתא מציע לנו אבן עזרא! אולם, בין אם הדבר מנחם אותנו ובין אם לאו, אין ספק שלרגע ההווה יש מעמד מיוחד: כל חוויותינו מתרחשות בהווה. אנו חשים, מרגישים וחושבים בהווה, וגם ההיזכרות בעבר ותכנון העתיד מתרחשים כולם בהווה. מהו אפוא מעמדם של העבר והעתיד? מהו מעמדם של רגעי זמן אשר חלפו, ושל אלה שטרם הגיעו? הייתכן שזיכרונותינו, שהם מוחשיים כל־כך, מתייחסים לדבר־מה שלא קיים בשום מובן? היש לרגעי העבר והעתיד קיום בכלל, מעבר למחשבתנו?

אל נקל ראש בשאלות אלה, שכן הן מנחות את מעשינו. אנו מרגישים מחויבים לקיים הבטחות שהבטחנו לאנשים שכבר אינם עימנו, ומרגישים מחויבים לדאוג לסביבתנו עבור אנשים שעדיין אינם קיימים – וכל זאת מתוך הנחה מובלעת, שלאותם אנשים שהיו בעבר ויהיו בעתיד יש סוג כלשהו של קיום, אשר מחייב אותנו להתייחס אליהם.

פילוסופים עסקו במעמדם של רגעי הזמן במשך מאות ואלפי שנים. אפשר להציג סקאלה של עמדות בנושא מעמדם של העבר, ההווה והעתיד, עם שני קצוות. אפשרות קיצונית אחת היא שכל הרגעים קיימים, החל מן העבר האינסופי (או בריאת העולם) וכלה בעתיד האינסופי (או סוף העולם), אך אנו, בני האדם, מסוגלים לחוות רק את ההווה. משול הדבר לאדם ההולך לאורך שביל מתחילתו אל סופו, והוא שרוי בערפל כבד, ועל כן בכל רגע הוא רואה רק את המקום שבו הוא נמצא. בקצה השני של הסקאלה מצויה האפשרות שרק ההווה קיים: העבר אין, והעתיד עדיין, וקיומם אינו אלא אשליה. משול הדבר לאדם אשר נדמה לו שהוא הולך על שביל, אך בכל רגע נוצרת רק פיסת השביל שתחת רגליו: זו שמאחוריו מתפוגגת ברגע שהוא עוזב אותה, וזו שלפניו עדיין לא נוצרה.

מעמדם של העבר והעתיד כה קשה לתפיסה, עד שאנו נזקקים למטאפורות כדי להבינו. עבודתה של מיכל קציר משמשת מטאפורה המאירה נושא זה באור מיוחד. בעבודתה של קציר מופיעים 36 רגעי עבר, שהונצחו במצלמתה בזה אחר זה. לאחר שצולמה כל תמונה האובייקטים המצולמים פורקו ואינם, ובמקומם נבנו אובייקטים אחרים, שצולמו בתמונה הבאה בתור. ההתרחשות בכל אחד מ־36 הרגעים התקיימה בעת הצילום – אך פורקה מייד לאחריו ולא נותר ממנה זכר. כל הרגעים הללו מונחים לפנינו בהווה. הם מונחים לפנינו יחדיו, בעת ובעונה אחת, ורק כך הם הופכים לתמונה בעלת משמעות עבורנו. הזמן שחלף והרגעים שהיו ואינם הופכים לתמונה ולסיפור רק כאשר הם נחווים יחדיו בהווה. בין אם רגעי עבר אלה קיימים במובן כלשהו, ובין אם הם חלפו ואין להם עוד שום קיום, הנצחתם במצלמה קיימת, והיא שמעניקה להם משמעות עבורנו. ההסתכלות בזמן הווה ב–36 רגעי העבר יחדיו היא שמעניקה לשורת רגעים זו את משמעותם ואת נוכחותם.

אורלי שנקר

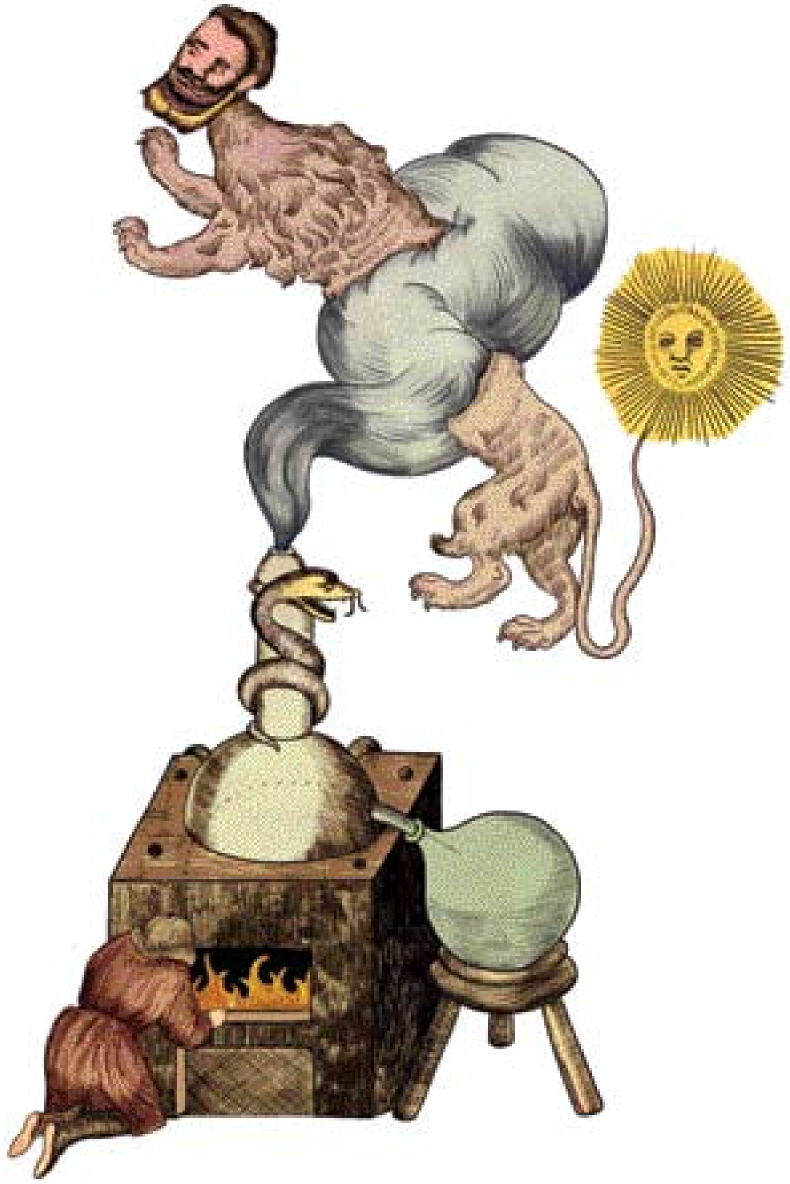
ד"ר אורלי שנקר, חוקרת ומלמדת פילוסופיה של המדע, של הפיזיקה ושל המוסר. היא חברת הוועדה המייעצת של כתב העת "אודיסאה"

■ העבודה "טווילה" היא פורטרט מתוך התערוכה "מחוברות", שהוצגה בתל אביב. כל פורטרט מורכב מסרט צילום (שחור־לבן) יחיד, של 36 פריימים, שכל אחד מהם נועד להיבנות כסט נפרד, כך שבהתקבצם יחד (כקונטקט שיט = הדפס מגע) ייווצרו פנים (סוג של תרגיל מחשבתי).

הסטים נבנו מחומרים שנמצאו בביתי: שמלות, סדינים, כריות, מגבות, נוצות, קערות אוכל של חתולים, כוסית ויסקי, צנצנת חמוצים, רישומים תלויים על קיר וכו'. אחרי צילום כל פריים פורק הסט ונבנה (לפעמים מאותם חומרים בדיוק) סט חדש, כך שאף פריים לא היה קיים במציאות במקביל לאחרים. הפורטרט הסופי היה בדמיוני בלבד.

זהו, למעשה, רישום עשוי מפיסול וצילום. בדרך שבחרתי (הרכבה) אפשר לעשות טעויות, וטעויות זה מה שמגדיר את האנשים הכי טוב. האף לא ממש מתחבר נכון, עין אחת צוחקת, אחרת בוכה. הכפילות והווריאציה עושות אותם אנושיים בעיניי.

מיכל קציר
("טווילה", 2000)



ארז בראון / איורים: בתיה קולטון

"הגישה המבטיחה לפתח רפואה המבוססת על 'גנומיקה אישית', שמונעת ברובה על־ידי אינטרסים מסחריים, תצטרך, כנראה, להסתפק בחיזוי גורמי סיכון. מיפוי הגנים מוסיף רק עוד נדבך אינפורמציה, שלא בהכרח מגדיל משמעותית את יכולת הניבוי של מחלות, כשרון או סוג המוזיקה שאדם יאהב, וגם לא אם יהיה הרפתקן או מדען דגול. אפילו אם יש בידינו את רצף ה־DNA המלא, לא נוכל 'לחשב' או 'לפענח' את האורגניזם"

גנים. בהחלט לא הכל בחיים

פענוח הגנום האנושי נראה כהבטחה הגדולה בהבנתנו את עצמנו. הנה אנו מסוגלים לנבא את תכונותיו ומסלול התפתחותו של כל אדם. לא חלפו עשר שנים מהפענוח ומתברר שכמו בכל גילוי, המערכת מורכבת הרבה יותר משהערכנו. הגנים כשלעצמם אינם קובעים את תכונותינו, לא מסבירים את ההבדל בין יצורים שונים וגם לא היווצרות מהירה של צורות חיים והתנהגות חדשות

" DNA, אתם יודעים, הוא כמו הזהב של המלך מידאס. כל מי שנוגע בו משתגע"

(הוראס ג'דסון, "היום השמיני של הבריאה")

■ פחות מעשור חלף מאז מיפוי הגנום האנושי, וכבר ניתן להבחין בסימנים מובהקים של משבר ואכזבה. הציפיות הגבוהות שנתלו בגנים כנושאי האינפורמציה המלאה להתפתחותו ולתפקודו של האורגניזם החי, לא מומשו. אט אט מתברר שהשונות בגנים עצמם רחוקה מלהסביר את ההבדלים המהותיים באנטומיה וביכולות הקוגניטיביות בין יצורים חיים. אם שונות גנטית כשלעצמה אין בה די כדי להסביר הבדלים בין יצורים השונים זה מזה מהותית, קל וחומר שהיא לא תוכל להסביר את השונות בפיזיולוגיה של יצורים בעלי גנום דומה.

בדומה למהפכות טכנולוגיות אחרות, כמו, למשל, המחשוב, ריצוף DNA יהיה בעתיד הקרוב תהליך זול, פשוט וזמין. מכאן קצרה הדרך לפנטזיית ה"גנומיקה האישית" (personal genomics). אדם ייכנס לרופא עם מפת הגנים שלו, ויקבל את סך תכונותיו, תחזית מחלותיו, כישוריו ואף אהבותיו. לפי חזון זה (יש שיאמרו, חזון בלהות), קריאת רצף ה־DNA שלנו תשמש לבדיקת התאמתנו למקום עבודה, לתמחור ביטוח הבריאות והחיים, להתאמת תרופות אישיות ואף למציאת בני זוג. האם ידיעת הגנים באמת מספקת את המידע הדרוש להבנת התפתחותו ותפקודו של האורגניזם? כמה מהשונות בין בני אדם מנבא ה–DNA? 100%? 50%? ואולי, כפי שמייד יתברר, הרבה פחות מכך?

ההבנה המחלחלת שאין יחס חד־ערכי בין הגנוטיפ (סך כל האינפורמציה התורשתית ב־DNA) לפנוטיפ (התכונות הפיזיות וההתנהגותיות בפועל), ושהגנים לבדם אינם יכולים לספק הסבר לשונות בין אורגניזמים, מחייבת בחינה מחודשת של תחומי המחקר הגנטי. תפיסת התא הביולוגי כמערכת טבעית, ולא כמכונה הנדסית או מחשב לוגי, מציבה אלטרנטיבה לגישה המקובלת ופותחת אפשרות להתבוננות רעננה על אחת הבעיות הפתוחות המרתקות ביותר שהתא מציג: **מהם המנגנונים התומכים בפוטנציאל האבולוציוני ליצירת תצורות חיים חדשות? ובמילים אחרות, מה מבדיל אדם משימפנזה, היצור הקרוב אלינו ביותר מבחינה אבולוציונית?**

>>

>> היום ברור שריבוי ה"חיווטים" והקשרים האפשריים באינטרקציות בין גנים בתנאים סביבתיים שונים מאפשר מספר עצום של תצורות ביטוי גנים, ואלו תומכות במגוון אבולוציוני אינסופי. מהן ההשלכות של שינויים אבולוציוניים **באופני האינטרקציה בין הגנים** (ולא בגנים עצמם) על מצב התא והיכולות שלו להסתגל לאתגרים שלא נצפו במהלך ההיסטוריה שלו? מהן ההשפעות של שינויים באופני ביטוי הגנים (כתוצאה מחיווט מחדש של הגנום והאינטרקציה עם הסביבה) על תהליכי ההתפתחות והופעת תצורות חיים חדשות? מה הקשר בין יכולת ההסתגלות התאית לסביבות משתנות והשונות הפיזיולוגית?

תשובות לשאלות אלו פותחות צוהר מרתק להבנת הביולוגיה, ומצוהר זה נשקפת תמונה שונה ואינטגרטיבית יותר של מורכבות התא וסביבתו. במאמר זה ננסה להתבונן על בעיות מרכזיות אלו מזווית ראייה שתופסת את התא החי כתהליך דינמי טבעי. **אנו נראה כי הגנים אינם לבדם על מרכז הבימה. בלעדיהם אין אמנם מחזה, אולם העלילה מקבלת תפניות מפתיעות לאו דווקא מהחלפת השחקנים, אלא מחילופי תפקידים.**

התפצח שימפנזה בשיר?

ההתפתחות המרשימה של הביולוגיה המולקולרית במאה ה־20 הובילה להבנה של תהליכים מרכזיים בתא החי. בתוך כך, הנטייה לפשט את התמונה הביולוגית הצריכה להגדיר סוג של "חלקיקים" יסודיים, ואלו נמצאו בדמותם של הגנים: רצפי DNA המקודדים לחלבונים – "סוסי העבודה" של התא.

הצלחת פרויקט הגנום האנושי הוכרזה כפתיחתו של עידן חדש, שבו סוף־סוף יתגלו לנו סודות טבע האדם. לא ניכנס כאן לשאלה מה בדיוק מייצג רצף DNA שנלקח ממספר קטן של אנשים, תוך התעלמות מהשונות בין בני האדם, אלא נתרכז בפרשנות הגנטית. נניח שכעת יש בידינו זיהוי שלם של רצפי ה־DNA המקודדים לחלבונים – כלומר, של הגנים עצמם. שאר רצף ה־DNA שאינו מקודד ישירות לחלבונים (למרות שהוא מהווה כ־90% מה־DNA האנושי!), אינו ניתן לפרשנות פשוטה, ואין בידינו מדד ברור להעריך איך מיתרגם שינוי ברצף הזה לשינוי ברמה הפונקציונלית, לפנוטיפ. לעומת זאת, לגנים עצמם, לפחות לכאורה, ניתן ליחס פונקציונליות פשוטה. זו הסיבה לכך שאנו מתבשרים חדשות לבקרים כי זוהה גן המעורב בחרדה, בהרפתקנות או בסקרנות, כמו גם גנים למחלות שונות, מסכיזופרניה ועד סוכרת.

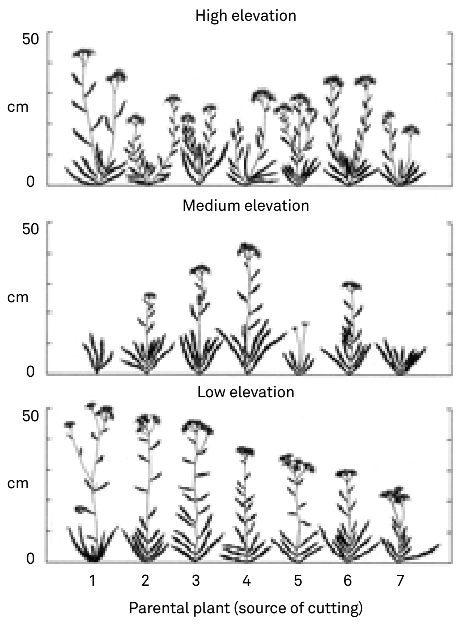
אין ספק כי הפנוטיפ של אורגניזם מוגדר בצורה רחבה על־ידי האפשרויות הטמונות ב־DNA שלו. זבוב לא יתחיל לכתוב ספר, ושימפנזה לא תפצח בשיר. אולם אין זה אומר כי ה־DNA קובע חד־ערכית, באמצעות הגנים, את תפקודו של האורגניזם האינדיבידואלי. למרות ההבטחות, עד היום נמצאה התאמה קטנה ביותר בין השונות הפנוטיפית של אינדיבידואלים לבין השונות הגנטית שלהם.

קחו, למשל, תכונה תורשתית מובהקת כמו גובה. כבר לפני למעלה ממאה שנה הבינו כי גובה ההורים הוא מנבא טוב לגובה ילדיהם. בשנה האחרונה ערכו שלוש קבוצות גדולות של חוקרים ניסויים, תוך שימוש בטכנולוגיה המודרנית ביותר, בקרב אוכלוסייה של עשרות אלפי נבדקים ובעלויות של עשרות מיליוני דולרים, כדי לחפש התאמה בין השונות בתכונת הגובה לבין השונות הגנטית. נמצאו עשרות אתרים ב־DNA האנושי החושפים מתאם בין השונות גנטית לגובה, אולם למרבה האכזבה, כל השונות הגנטית הזאת יכולה להסביר פחות מכ־5% מהשונות בגובה. בנוסף, יש חפיפה קטנה ביותר בין האזורים ב־DNA שמופו על־ידי הקבוצות השונות, דבר המקטין את חשיבות הגנים הספציפיים לתופעה עצמה. לנוכח העובדה שגובה הוא במובהק תכונה תורשתית, הפער הזה מטריד במיוחד וגורם מבוכה רבה לקהילת החוקרים העוסקת בתחום.

התוצאה ברורה: לא ניתן להסביר שונות פיזיולוגית בצורה פשוטה על־ידי קריאת השונות בגנים. עשויות להיות לכך מספר סיבות. ייתכן, למשל, כי עשרות האתרים שאותרו אינם מספיקים, ושיש לבדוק מספר גדול בהרבה של גנים עם השפעות קטנות יותר – אפשרות שמעוררת בעיות רציניות.

שאלה עקרונית יותר היא, כיצד נחליט מהו אתר רלוונטי? בכל מקרה שבו משתתף בתהליך מספר גדול של גנים, שהשפעתו של כל אחד מהם

"התפיסה לפיה מספר קטן של גנים גורם לתופעות מורכבות נבנתה על סמך מספר לא מייצג של מקרים, שבהם גן יחיד או מוטציה במקום מסוים נמצאו במופע הכרחי עם המחלה (למשל, בטאי־זקס). העובדות מלמדות כי למעט מקרים מיוחדים אלו (המהווים, לפי הערכות, פחות מ־2% מכל המחלות הידועות), לא ניתן להסיק מקריאת רצף הגנים את מהלך התפתחותו ותפקודו של האורגניזם"



איור 1:
שיבוט של שבעה צמחי אכילאה השונים זה מזה גנטית, שגודלו בשלושה גבהים שונים. בכל עמודה הצמחים בגבהים השונים זהים גנטית. השונות עקב סביבה גדולה לפחות כמו השונות הגנטית.
R. Lewontin, "The Triple Helix: Gene, Organism and)
(Environment" Harvard University Press, 2000

בפני עצמו קטנה, עלינו לחתוך את מספר האתרים הנבדקים על־ידי קביעת סף שרירותי, המנפה את כל האתרים מתחת לחוזק מסוים. לרוע המזל, ייתכן שאין לנו יכולת אמיתית לעשות זאת: אם כמות האתרים שצריכה להילקח בחשבון היא כה גדולה, וההשפעה של כל אחד מהם כה קטנה, כל חיתוך מלאכותי שיותיר בניסוי קבוצת גנים אחת ויוציא אחרת, ייתן תוצאה שונה.

זוהי, כאמור, רק אחת מהאפשרויות; האחרות לא מרגיעות יותר. בהחלט ייתכן כי תהליכים אפיגנטיים – תהליכים "מעל הגנים" המערבים גם את השפעת הסביבה מדורות קודמים – אחראיים לחלק מהתורשה. לחלופין, ייתכן כי שינויים באופני בקרת הגנים על־ידי הסביבה (התאית והחיצונית), ולא בגנים עצמם, ממלאים תפקיד חשוב (על כך נרחיב בהמשך) בתורשה, וכן הלאה.

ראו בהקשר זה את מאמרה של פרופ' חוה יבלונקה ב"אודיסאה", גיליון 2. במאמר מובאות דוגמאות רבות של תורשה אפיגנטית. פירוט רחב יותר מופיע בספרה "אבולוציה בארבעה מימדים", שיצא בעברית.

הגובה אינו תכונה יוצאת דופן. המטרה האמיתית היא לפתח יכולות ניבוי למחלות כמו סוכרת, מחלות לב ואחרות, ובתחום זה מצב המיפוי הגנומי אינו יותר טוב. המצב חמור במיוחד בכל הקשור במחלות נפשיות. מחקרים המודדים דמיון בין זוגות תאומים זהים – בעלי אותו הגנום – בהשוואה לזוגות תאומים שאינם זהים (כמו גם שיטות אחרות), טוענים לאחוזי תורשה גבוהים בתופעות כמו אוטיזם וסכיזופרניה. אפילו אם נניח כי קיים כאן מרכיב תורשתי, נמצא פער משמעותי בין ההנחות על רמת התורשה והממצאים בשונות הגנטית. המקרה של סכיזופרניה הוא דוגמה שערורייתית מייצגת, מכיוון שעד היום לא בודד אפילו גן אחד הקשור בצורה ברורה למחלה, והתבוננות מעמיקה מחזירה את הכדור למגרש הסטטיסטי, המראה כי העדויות לכך שהמחלה בעלת מרכיב תורשתי מובהק חלשות ביותר.

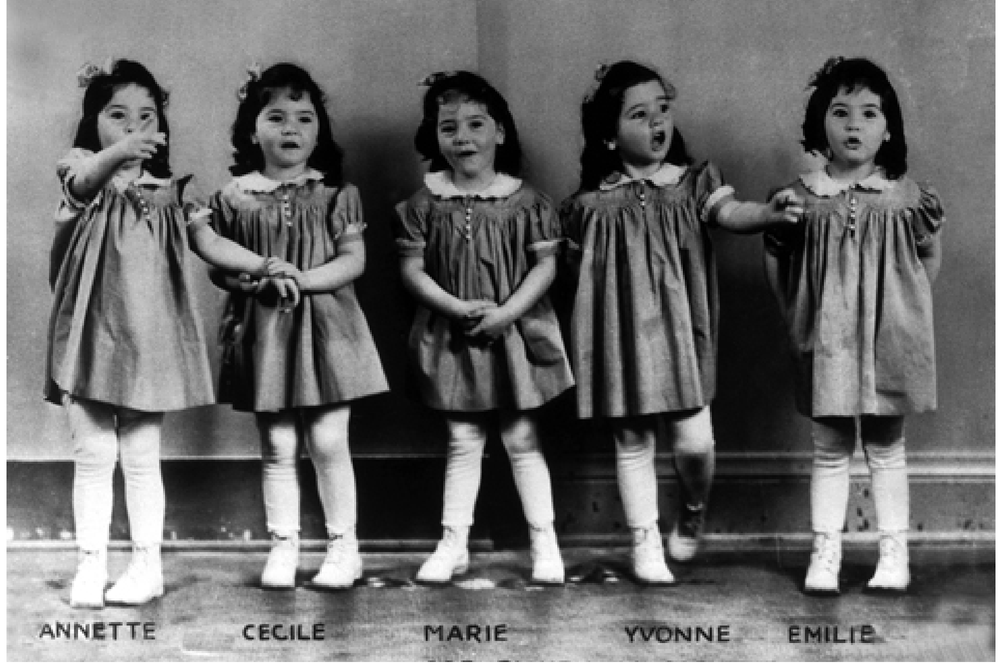
המספרים הגבוהים המצוטטים בספרות שגויים בצורה מגמתית ומערבים מרכיב אידיאולוגי ואינטרסים מסחריים של חברות התרופות. אלה דורשים דיון מיוחד מעבר למאמר זה. ראו Lewontin "Biology As Ideology"

חשוב להיזכר איך נוצרו הציפיות הגבוהות להגיע ל"גנים האחראיים". התפיסה לפיה מספר קטן של גנים גורם לתופעות מורכבות נבנתה על סמך מספר לא מייצג של מקרים, שבהם גן יחיד או מוטציה במקום מסוים נמצאו במופע הכרחי עם המחלה (למשל, בטאי־זקס או תסמונת דאון). העובדות מלמדות כי למעט מקרים מיוחדים אלו (המהווים, לפי הערכות מפוכחות, פחות מ־2% מכל המחלות הידועות), לא ניתן להסיק מקריאת רצף הגנים את מהלך התפתחותו ותפקודו של האורגניזם האינדיבידואלי, וגם ההיסק הסטטיסטי באוכלוסייה דורש זהירות רבה. לו היה מדובר בתרגיל מחשבתי או סטטיסטי בלבד – ניחא, אולם ההשלכות של היצמדות למדדים גנומיים קלים למדידה על איכות חיינו בכלל, ועל איכות חייהם של החולים שבינינו בפרט, מפחידות.

הטענה הרווחת כי ידיעת רצף ה־DNA של אורגניזם מספקת אינפורמציה מלאה על התפתחותו ותפקודו שגויה בבסיסה, כפי שעולה מדוגמאות רבות נוספות. למשל, בצמחים מסוימים ניתן להפריד מהצמח הבוגר חלק קטן ולגדל ממנו צמח שלם, שזהה גנטית למקורו. חלקי צמח כאלו שיגודלו בגבהים שונים ייראו שונים זה מזה במידה רבה, לעיתים אף יותר מצמחים בעלי שונות גנטית הגדלים באותה סביבה (ראו איור 1). אין אפשרות להסיק מגידול בגובה אחד על הפנוטיפ בגובה אחר. תופעה זאת אינה ייחודית לצמחים; היא נצפתה גם בזבובים וביצורים אחרים. העובדה כי סביבה משפיעה על הפנוטיפ מוכרת, אך ההכרה בכך ששינויים סביבתיים קטנים יכולים לגרום לאפקטים פיזיולוגיים חזקים אף מאלו הנגרמים עקב שונות גנטית, עדיין לא מצאה את ביטויה הראוי בספרות.

הבעיה המרכזית היא שלרוב, לא ניתן באמת להפריד בין הסביבה והגנטיקה, והנטייה לפשט את התמונה הסבוכה שמציגה הביולוגיה גורמת להטיית הממצאים לכיוון הגנטי דווקא, מכיוון שאותו קל למדוד. בנוסף, בהקשר של מחלות, השמת הדגש על הגנום הופכת את הבעיה ל"ביולוגית" (בניגוד, למשל, לסוציו־אקונומית) ואז ניתן "לטפל" בה בעזרת תרופות.

דוגמה מצמררת לרגישות לסביבה ניתן למצוא במקרה המפורסם של חמישיית דיון (Dionne), שנולדה ב־1934 והיתה החמישייה הזהה הראשונה בעולם ששרדה עד גיל בגרות (ראו צילום בעמוד הבא). ממשלת קנדה "הפקיעה" למעשה את החמישייה מידי הוריה, כשאנשים מכל העולם באים לחזות בפלא, תמורת תשלום, בבית תצוגה שנבנה >>



חמישיית Dionne. אימג' בנק

>>

במיוחד. האחיות גודלו ב"גן החיות" המיוחד הזה בתנאים זהים תחת השגחה קפדנית, בלי שתינתן להן האפשרות להיפגש עם זרים. למרות שהגנום של האחיות זהה ותנאי הסביבה היו זהים ככל שניתן ב־7 השנים עד שהן שוחררו חזרה לביתן, האחיות גדלו להיות שונות: אחת נפטרה בגיל מוקדם כשהיא סובלת מאפילפסיה, אחרת נפטרה זמן מה לאחר מכן מתזונה לקויה, ובין השלוש האחרות נמצאו הבדלים גדולים.

כדוגמה אחרונה לאי־היכולת לחזות את הפנוטיפ על סמך שינויים גנטיים אזכיר את המקרה הידוע של כרומוזום 15. חֶסר בקטע מסוים של כרומוזום זה גורם למחלת Angelman Syndrome, המתבטאת, בין היתר, בפיגור שכלי ללא יכולת דיבור. למרבה ההפתעה, מחלה בעלת סממנים אחרים לגמרי, Prader - Willi Syndrome, שביטוייה הם השמנה קיצונית, ידיים ורגליים קטנות ועוד, יכולה להיגרם על־ידי אותה מוטציה בדיוק. אם כן, חסר בכרומוזום 15 עלול לגרום אצל חלק מהאנשים למחלה אחת, ואצל אחרים – לאחרת, שונה לחלוטין. סוג המחלה נקבע בהתאם למקור הכרומוזום הפגום: האב או האם. במקרה זה ברור כי אינפורמציה אפיגנטית העוברת בתורשה היא זו שקובעת ביטוי פנוטיפי שונה בתכלית לאותו פגם גנטי.

הגישה המבטיחה לפתח רפואה המבוססת על "גנומיקה אישית", שמונעת ברובה על־ידי אינטרסים מסחריים, תצטרך, כנראה, להסתפק בחיזוי גורמי סיכון. מיפוי הגנים מוסיף רק עוד נדבך אינפורמציה, שלא בהכרח מגדיל משמעותית את יכולת הניבוי של מחלות, כשרון או סוג המוזיקה שאדם יאהב, וגם לא אם יהיה הרפתקן או מדען דגול. אפילו אם יש בידינו את רצף ה־DNA המלא, לא נוכל "לחשב" או "לפענח" את האורגניזם.

התקווה להבין את הפיזיולוגיה רק על סמך ידיעת הגנים מזכירה במידה מסוימת את האלכימיה של ימים עברו. במרוץ אחר ה"זהב" הגנומי נשמטו בשולי הדרך תהליכים חשובים, המאפשרים יצירת שונות בעולם החי ואחראים במידה רבה לפוטנציאל האבולוציוני המרשים הניכר בכל פינה בטבע. הגנום עצמו אינו "מחשב" את האורגניזם. הכרה זו היא המפתח להבנה, שדרושה תפיסה חדשה כדי להבין לעומק את התהליכים הביולוגיים המאפשרים התפתחות ואבולוציה.

אז היכן מצוי המידע על האורגניזם?

אחת התוצאות המפתיעות של מיפוי רצף ה־DNA היא, שמספרם של הגנים אינו קשור כלל לרמת המורכבות של יצורים שונים או ליכולותיהם התפקודיות. כך, למשל, לאורז יש מספר גנים גדול מזה של האדם, למרות שלפי כל מדד, ובלי להיכנס להגדרה המדויקת של מורכבות אורגניזם, אנו נוטים לחשוב כי אדם מורכב במידה ניכרת מאורז (או, לצורך העניין, מצמחים שונים, שגם להם מספר גנים גדול).

אם ספירת גנים אינה משקפת את יכולותיו ומורכבותו של אורגניזם, האם קיים מדד אחר? התשובה לכך טמונה בהכרה, כי מימוש פונקציה ביולוגית הוא תוצאה של תהליך קולקטיבי. בתהליך זה מספר גדול של גנים בתא בא לידי ביטוי באורח דינמי, שהסביבה (המקומית והמורחבת) ממלאת בו תפקיד מרכזי. ביטוי גנים מובן לצורך זה בהקשר הדינמי, ולא כבעיה סטטית או מבנית.

לרוב התאים בגופנו יש אותו גנום, ולמרות זאת הם יכולים להיות שונים מהותית, מכיון שבכל סוג של תא בא לידי ביטוי – כלומר, ממומש בצורת חלבונים – רק חלק מהגנום (מהרצף המקודד של הגן נוצרים חלבונים ספציפיים בתהליך המבוקר על־ידי מערכות הבקרה הגנטיות).

על חלק מפעילויות ומנגנוני הבקרה הפועלים בתא ראו מאמרם של חיים סידר ורזי גרינפלד בגיליון זה. המאמר עוסק במחקר תאי גזע עובריים.

הפונקציה התאית היא תהליך קולקטיבי של גנים שבאו לידי ביטוי עקב אינטרקציה עם הסביבה, ותהליך זה אינו סיכום פשוט של פעולת הגנים הבודדים. עלינו לחשוב, אם כך, על **תבניות של ביטוי גנים** ויכולות השינוי שלהם כפונקציה של זמן והֶקשר. תבנית ביטוי הגנים מאפשרת להבדיל תא עור מתא מוח, למשל, למרות ששניהם נושאים בדיוק את אותו גנום, אותן מולקולות DNA.

"המקרה המפורסם של חמישיית התאומות הזהות (משפחת דיון) מדגים כי למרות שהגנום של האחיות זהה ותנאי הסביבה היו זהים ככל שניתן, האחיות גדלו להיות שונות: אחת נפטרה בגיל מוקדם כשהיא סובלת מאפילפסיה, אחרת נפטרה זמן מה לאחר מכן מתזונה לקויה, ובין השלוש האחרות נמצאו הבדלים גדולים"

במעבר מהגנום לאורגניזם קיימות מספר רמות ארגון. אלה מבקרות את התהליך המורכב של ביטוי הגנים, מייצבות תבניות ביטוי מסוימות וחוסמות אחרות, ודואגות להעביר תבניות ספציפיות מתא־אם לתאי־בנות בתורשה אפיגנטית יציבה. תיאור תא על־ידי תבנית ביטוי הגנים שלו ברגע נתון מגדיר את זהותו הייחודית ואת תפקודו באורגניזם רב־תאי (כגון, תא עור, תא עצב, תא לב וכו').

מצב התא נקבע על־ידי אוסף החלבונים המבוטא בו בכל רגע נתון והאינטרקציות ביניהם. למשל, בריפוי חתך תאי עור יגדלו מתאי עור אחרים כדי לרפא את הפצע. לתאים החדשים יש עקרונית פוטנציאל להפוך לכל אחד מסוגי התאים הבונים את גופנו, מכיון שכל התאים מכילים את הגנום המלא של האורגניזם. אולם תא עור יוצר תאי עור, ולא תאי מוח או לב.

התהליך הזה יכול להשתבש לעיתים וליצור סוג תא שאינו יציב, בדרך־כלל תא סרטני, אולם לרוב הוא תקין ומובטח על־ידי היכולת של תא להעביר בתורשה שאינה גנטית את תבנית הביטוי היציבה שלו. האינפורמציה ל"יצירת" האורגניזם היא, אם כן, תהליך דינמי סבוך הרגיש **לתנאי הסביבה ולגורמים פנימיים**. הרגישות הזאת מאפשרת שונות גבוהה בין אורגניזמים (אפילו כאלו הזהים גנטית). **זהו הבסיס לאינדיבידואליות ביולוגית מעבר לשונות הגנטית**.

בבסיס ההיווצרות של תבניות ביטוי הגנים השונות עומד תהליך **קומבינטורי**: מספר הקומבינציות האפשריות של הגנים שבאו לידי ביטוי גדל כתהליך מעריכי (חזקה), ולא באופן ליניארי עם מספר הגנים, ולכן הוא יכול להגיע, אפילו באורגניזם עם מספר מועט יחסית של גנים, למספרים אסטרונומיים. לפיכך, על מנת לקבוע את מרחב האפשרויות של, אדם עם 25,000 גנים, לעומת תולעת עם 20,000 גנים ההשוואה הנכונה לא תהיה ביחס המספרי של הגנים (25,000/20,000), אלא במספר תבניות הביטוי היציבות שלהם. כך, למשל, אם נניח דוגמה קיצונית, שבה בהשפעת הסביבה כל גן יכול להיות באחד משני מצבים: מודלק (בא לידי ביטוי) או מכובה (אינו בא לידי ביטוי), אזי מספר התבניות האפשרי בגנום האנושי לעומת גנום התולעת הוא $2^{25,000}/2^{20,000}$ – בערך 10^{1500} יותר אפשרויות לאדם (10 עם 1,500 אפסים אחריו!), מספר "בלתי־ספיר" לכל הדעות (לשם השוואה, מספר החלקיקים ביקום מוערך בכ־ 10^{80}).

המספר האסטרונומי הזה מבטא את מורכבות המערכת. יחד עם זאת, למרות המספר האדיר של תבניות ביטוי אפשריות, מספר סוגי התאים היציבים בעובר מתפתח קטן ביותר – כ־250 באדם. מה הגורם לפער זה בין מספר תבניות ביטוי הגנים האפשריות לבין מספר סוגי התאים הנוצרים בפועל? זו אחת השאלות הפתוחות העמוקות בביולוגיה.

התא הביולוגי כמערכת דינמית טבעית

הדימוי של האורגניזם למכונה עתיק ביותר ומזוהה במידה רבה עם משנתו הפילוסופית של רנה דקארט. סוג המכונה משתנה מדור לדור, בהתאם לטכנולוגיה המעודכנת לאותו הדור – מהמכונה ההידראולית של דקארט ועד למחשב המודרני כיום. לרוע המזל, כפי שקורה לעיתים, הדימוי הזה חרג בהרבה מהשימוש המטאפורי שלו והפך למודל או להיפותזה הנלקחים ברצינות: האורגניזם כבר אינו דומה למכונה; הוא בעצמו מכונה – ומהמודל הזה נגזרים תכנוני הניסויים ופרשנויות תוצאותיהם.

במובן הזה תוצרי הטבע עולים לאין שיעור על דמיונם של המדענים. סופרי המדע הבדיוני בעבר היו בעלי חזון מרחיק לכת לעומת מדעני ההווה. מדוע שהביולוגיה תציית לחוקים המעודכנים בכל דור לפי היכולת ההנדסית העכשווית? התא הביולוגי, ואיתו גם האורגניזם, הם תוצאה של

>>

"ההבנה המחלחלת שאין יחס חד־ערכי בין הגנוטיפ (סך כל האינפורמציה התורשתית ב־DNA) לפנוטיפ (התכונות הפיזיות וההתנהגותיות בפועל), ושהגנים לבדם אינם יכולים לספק הסבר לשונות בין אורגניזמים, מחייבת בחינה מחודשת של תחומי המחקר הגנטי"

>> תהליכים אבולוציוניים טבעיים, הרחוקים מאוד בטבעם ממכונות הנדסיות שמתוכננות לקיים פונקציות ספציפיות. תא ביולוגי דומה יותר לרישומים של Rube Goldberg – קריקטוריסט אמריקאי שהיטיב לתאר ברישומיו "מכונות טבעיות". במכונות אלו יש מספר רב של חלקים, שלאף אחד מהם אין לוגיקה ברורה הקושרת אותו לפונקציית ה"מכונה", ולמרות זאת לא רק שאינו מיותר, אלא שבהעדרו הפונקציה אינה ניתנת למימוש.

אכן, אבולוציה אינה תהליך אופטימיזציה. כפי שהיטיב לתאר הביולוג פרנסואה ז'קוב (Francois Jacob), אבולוציה פועלת כמאלתר (tinkerer) משתמשת במה שיש בסביבה כדי לאלתר פונקציות חדשות. לא רק שהתא השלם מציג תוצאה הרחוקה מסכום היכולות של חלקיו. בניגוד למכונה מעשה ידי אדם, החלקים כלל אינם מוגדרים ללא ההקשר השלם.

הפוטנציאל האבולוציוני ויצירת תצורות חיים חדשות

צ'ארלס דרווין מסיים את ספרו "מוצא המינים" בפיסקה מפורסמת:

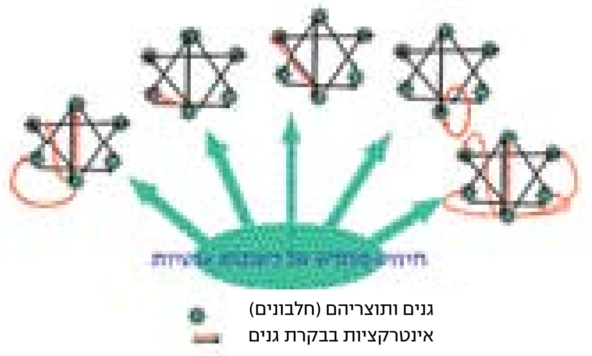
"...whilst this planet has gone cycling on according to the fixed law of gravity, from so simple a beginning endless forms most beautiful and most wonderful have been, and are being, evolved."

במשפט פיוטי זה הציב למעשה דרווין אתגר לדורות הבאים: מהם המנגנונים הביולוגיים והתהליכים האבולוציוניים, המאפשרים את יצירת השונות האדירה בעולם החי והצומח המוכר לנו כיום? בעיה זו נמצאת בחזית המחקר הביולוגי, והיא עדיין רחוקה מלהיות מפוענחת. כיצד נוצרות תצורות חדשות באורגניזמים (למשל, איבר חדש או תבנית התפתחות שלא היתה קודם)? כיצד התאים המרכיבים את האורגניזם מתמודדים עם אתגרים שלא נחשפו אליהם קודם במהלך ההיסטוריה האבולוציונית שלהם? כיצד מצבים חדשים נשמרים בזיכרון ומתקבעים לאורך דורות?

בהבדלים בין יצורים שונים, כמו בין אדם לשימפנזה, לשונות גנטית יש תפקיד חשוב, אולם, כפי שגם נוכחנו עד כה, השונות בגנים אינה מספיקה כדי להסביר את טווח השינויים הפנוטיפיים הנצפים. הדבר נכון גם כשעורכים השוואה בין אורגניזמים רחוקים יותר מבחינה אבולוציונית, כמו בין אדם לעכבר, לדוגמה. למרות שאנו מבינים את התהליכים המולקולריים המרכזיים בתא ומכירים את רצף ה־DNA המלא של האדם והעכבר, די מפתיע שאין בידינו הסבר מה הגורם לשונות הגדולה בין האורגניזמים. מדוע, למשל, העכבר כה קטן בגודלו יחסית אלינו?

במחקר שעסק בשאלת ההבדל בין אדם ושימפנזה (King & Wilson 1975), הועלתה כבר לפני למעלה מ־30 שנה ההבחנה, שאבולוציה מתרחשת בשתי רמות לפחות: במישור הראשון, שינויים בגנים עצמם, ובמישור השני, שינויים במערכות הבקרה המפעילות את הגנים וקובעות את תבניות הביטוי. בשנים האחרונות הוברר כי לתהליך השני תפקיד חשוב בעיצוב תצורות ההתפתחות במהלך האבולוציה. כך, למשל, השוואת רצפי ה־DNA בין עכבר לאדם מראה על שינויים גדולים יחסית דווקא בין האזורים שאינם מקודדים לחלבונים – באזורים בין הגנים שיכולים למלא תפקיד בבקרת ביטוי הגנים. לפי שעה איננו יודעים עדיין להעריך את המשמעות של שינויים אלו ואיך הם מיתרגמים לרמה הפונקציונלית.

דרושה לנו, לפיכך, גישה חדשה החורגת מהשוואת רצפי DNA גרידא. אם נשרטט את מפת האינטרקציות האפשרית בין הגנים, כאשר גן הבא באינטרקציה עם גן אחר מחובר אליו בחץ, נקבל גרף (למעשה, רשת) שבו



חיווט מחדש של רשתות גנטיות

הגנים הם הקודקודים (ראו איור). באינטרקציות מעורבים למעשה תוצרי הגנים (ה־DNA, כאמור, הוא גורם סביל לחלוטין), והן יכולות להתרחש ברמות ארגון שונות – למשל, בין חלבון ל־DNA או בין חלבון לחלבון. החיצים הללו חייבים לתאר גם את "עוצמת" האינטרקציה, המושפעת מהדינמיקה של שאר הגנים והאינטרקציה שלהם עם הסביבה. כיום, אין אנו עדיין יודעים את צֶבר הגרפים האפשריים אפילו לאורגניזמים הפשוטים ביותר.

כעת נדמיין, כי עקב שינויים ברצפי DNA במהלך האבולוציה חלו תמורות משמעותיות ברשת האינטרקציות הזאת: נוצרו הזדמנויות לאינטרקציות חדשות שלא היו אפשריות קודם, בעוד שאחרות לא מתאפשרות עוד. אם נדמה את גרף האינטרקציות הגנטיות למעגל חשמלי הממפה את החיבור בין הרכיבים, כשהגנים משמשים כרכיבים הפונקציונליים (שוב, בתהליך מעורבים, למעשה, תוצרי הגנים – החלבונים), נקבל שינויים אבולוציוניים המיתרגמים לחיווט מחדש של המערכת הגנטית – שינוי באופני הבקרה של התא. כך ניתן לקבל מאותו מעגל פונקציות שונות – כלומר, תבניות חדשות של ביטוי גנים – אף ללא שינויים מהותיים בגנים עצמם (רכיבי המעגל).

ממחקרים שנערכו בשנים האחרונות עולה, כי חיווט מחדש של מערכות בקרה גנטיות במהלך האבולוציה אכן מהווה מנגנון חשוב ביצירת תצורות חיים חדשות וביכולת העמידה של האורגניזם בפני אתגרים חדשים. חקירת ההיסטוריה האבולוציונית, הנסמכת על השוואה בין אורגניזמים קיימים, מובילה להנחה השגויה, כי בבסיס תהליך ההתפתחות של אורגניזם עומדת רשת סטטית (מבנית) של חיווטים בין הגנים, וכל שעלינו לדעת הוא מי מפעיל את מי. למעשה, הרשת היא דינמית – מערך האינטרקציות בין הגנים ועוצמתן באורגניזם נתון הם פונקציה סבוכה של זמן, היסטוריה, סביבה, וכל אינטרקציה תלויה בהרכב שאר חלקי הרשת. הבנת הדינמיקה של התהליך היא המפתח להבנת הפוטנציאל האבולוציוני עצמו. חיווט מחדש במהלך האבולוציה אמנם משנה את מכלול האילוצים על מגוון האינטרקציות שרשת גנטית מסוימת יכולה לממש, אולם האינטרקציות בפועל נקבעות באופן דינמי במהלך חייו של התא.

הבעיה מחוללת את הפתרון

"מנון: ובאיזו דרך תחפש, סוקרטס, אחרי דבר שאינך יודע כלל מהו? שהרי מה בין הדברים שלא ידעת תשים לך מטרה בחיפושך? ואפילו יזדמן לך כאשר יזדמן – כיצד תכירנו לדעת שהוא דבר זה שלא ידעתו?"

(אפלטון– הדיאלוג מנון)

כיצד מערכת ביולוגית "מוצאת" פתרונות לאתגרים שלא נתקלה בהם קודם? המערכת הביולוגית (אורגניזמים, מערכת פיזיולוגית בתוך אורגניזם או אפילו תא) נתקלת באותה בעיה שהעסיקה את מנון בדיאלוג העתיק עם סוקרטס: הצורך למצוא בזמן קצר פתרון לבעיה שאינה מוגדרת מראש, "לשוטט" במערכת בחיפוש ללא מטרה מוגדרת, לא להכיר את הפתרון המבוקש אפילו כאשר נתקלים בו, ובכל זאת למצוא את הפוטנציאל.

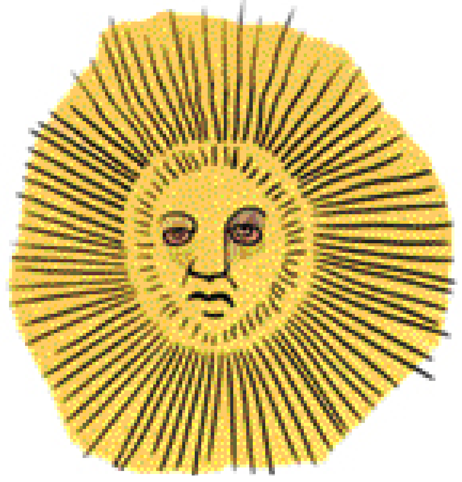
התא הביולוגי צריך למצוא בזמן קצר מענה לאתגרים החדשים שמציבה בפניו האבולוציה. מענים אלה אינם מוטבעים במערכת ואינם "מהונדסים" במעגלי הבקרה, מכיוון שהם לא נצפו במהלך ההיסטוריה האבולוציונית. המערכת צריכה ללמוד להתמודד עם האתגרים החדשים ולשמור את תוצאות הלימוד בזיכרון לדורות הבאים. רק כך נוצרים התנאים לקיבוע תצורות חיים חדשות.

הבעיה למצוא פתרון לאתגר חדש משותפת למערכות ביולוגיות שונות בעלות דמיון מסוים בעקרונות הפעולה. למשל, המערכת העצבית המרכזית או המערכת החיסונית צריכות גם הן להתמודד עם אתגרים שלא נצפו קודם, ללמוד ולשמור בזיכרון את תוצרי הלימוד. הפתרון אינו מוטבע במערכת, מכיוון שלא מוגדרת עבור מערכות אלו מטרה סופית ואף לא כיוון לפתרון מסוים. אפשרות מרתקת היא שהמערכות הללו מפעילות תהליכי שיטוט אקראי במרחב המצבים הפוטנציאלי שלהן, יחד עם תהליכי סלקציה המאפשרים התכנסות. הרעיון הזה אינו חדש, אולם למרות שהוא נראה טבעי לגמרי, הוא אינו מהווה חלק מהתפיסה המקובלת היום בזרם המרכזי בביולוגיה.

בהקשר התאי נהוג לחשוב על מערכת בקרת הגנים כעל מעגל לוגי ה"מתוכנן" היטב לביצוע פונקציות מסוימות. כמובן שה"תכנון" הוא תוצאה של תהליכי ברירה טבעית במהלך האבולוציה, שעיצבו את המערכת בצורה אופטימלית. האם המודל של מעגל לוגי הוא תיאור מהימן של תהליך בקרת גנים בכל מצבי התא האפשריים? התשובה לשאלה זאת קשורה קשר הדוק לנושאים שהועלו קודם: התיאור המוקצן של תא כמכונה והאבולוציה של מערכות הבקרה וחשיבותן ליצירת תצורות חיים חדשות.

בניסויי מעבדה שערכנו בתאי שמרים – מיקרואורגניזם המשמש כמודל פשוט יחסית לתאים של אורגניזמים מפותחים כמו יונקים, יצרנו באופן מלאכותי את התהליך האבולוציוני של **חיווט מחדש של מערכת הבקרה**. בעזרת שיטות סטנדרטיות של הנדסה גנטית ניתקנו גן חיוני ממערכת הבקרה הטבעית שלו והצמדנו אותו למערכת בקרה זרה בעלת פונקציות שונות לחלוטין. המערכת הזאת הופכת להיות מעניינת כאשר משנים עבור התאים המהונדסים את תנאי הסביבה, כך שהם הופכים להיות מאתגרים במיוחד. בתנאי הסביבה החדשים, הגן שעבר חיווט מחדש נדרש למאמץ אינטנסיבי כדי לייצר חומרים חיוניים חסרים, בעוד שמערכת הבקרה הזרה האמורה להפעיל אותו, נוטה להיסגר באופן חזק דווקא בתנאי סביבה אלו. מה יקרה לתאים במצב מתסכל זה?

על פניו, נראה שהם נידונים לאבדון. למרבה ההפתעה, התאים אמנם חווים משבר קשה, אולם בזמן קצר להפליא – דורות ספורים בלבד, הם התאוששו ו"פתרו" את האתגר שהוצב בפניהם. יתרה מזאת, הפתרון שנמצא על־ >>



ידיהם הועבר במלואו בתורשה לדורות הבאים, כך שהסרת תנאי הסביבה המאתגרים והחזרתם לאחר מספר רב של דורות לא היוותה אתגר מחודש. על סמך זאת ניתן להגיד, כי התאים עצמם מראים יכולת של לימוד וזיכרון שבדרך־כלל מיוחסת למערכות פיזיולוגיות באורגניזמים מורכבים.

חקירת תהליכי ההסתגלות במערכת זאת חשפה בפנינו אופנים דינמיים חדשים ופתחה אפשרות לחקור את הפוטנציאל האבולוציוני הטמון בתא בתנאי מעבדה. אין צורך להיכנס כאן לפרטים נוספים מלבד השאלה: מה קרה לתבניות ביטוי הגנים במהלך תהליך ההסתגלות של התאים? התבוננות מעמיקה בתבניות אלו מעלה ממצאים מפתיעים.

בקליפת אגוז, שלוש תופעות מרכזיות נצפו במהלך ניסויים אלו:

1. בשינוי תנאי הסביבה למצב מאתגר התרחש שינוי כולל ומקיף בתבניות הביטוי: כרבע עד שליש ממספר הגנים הכולל שינו במידה מהותית את עוצמת הביטוי שלהם.

2. גנים השייכים לקבוצות פונקציונליות מוגדרות היטב, ואשר בתנאים רגילים דפוסי הפעילות שלהם תלויים זה בזה, פיתחו אופני תגובה שונים. לעומת זאת, גנים שאין ביניהם קשרים פונקציונליים ידועים, החלו פתאום לפעול יחדיו.

3. התוצאה המפתיעה ביותר היא, שלמרות השינוי הגדול במספר רב של גנים, תבניות ביטוי הגנים הראו חפיפה מועטה בין ניסויים חוזרים באותם תנאים בדיוק. למעשה, השינוי הכולל בביטוי הגנים בתהליך ההסתגלות היה במידה רבה אקראי, למרות שכאמור, תגובת ההסתגלות ברמה הפונקציונלית התאית חזרה על עצמה. המשמעות היא שאותו פתרון פונקציונלי שאימצו התאים, נתמך בכל ניסוי על־ידי אופני ביטוי גנים שהיו שונים מהותית. במילים אחרות, התרגום מתבנית ביטוי הגנים לפונקציה (פנוטיפ) אינו חד־ערכי – תבניות ביטוי שונות גורמות לאותו פנוטיפ, כאשר הגנום והסביבה הם האילוצים הגורמים לחיזוק תבניות ביטוי מסוימות ולסילוקן של אחרות.

למרות שתידרש עוד עבודה רבה להבין את פרטי המערכת, ניתן לראות כי מערכת בקרת הגנים שייכת אף היא לסוג המערכות ה"לומדות". תהליך ההסתגלות התאי הוא בעיקרו תהליך למידה, תהליך של שיטוט במרחב התגובות העצום של המערכת. הסתגלות מתאפשרת כאשר התהליך הפיזיולוגי מאפשר התכנסות של תהליך השיטוט.

תפיסת התא החי כמערכת דינמית טבעית, אשר גבולותיה ואופי פעולתה נקבעים על־ידי אילוצי הסביבה והגנום, מאפשרת היום לנסות ולענות על האתגר שהציב דרווין לפני כ־150 שנה – כיצד מהתחלה פשוטה נוצרה סביבנו השונות האינסופית בטבע. ניסינו להראות כי התשובה לשאלה זאת דורשת הרחבה משמעותית של התפיסות המקובלות כחלק מהמסע האינטלקטואלי המרתק אל נבכי הביולוגיה ■

erez@physics.technion.ac.il

תודתי לחברי מהמעבדה לחקר רשתות ביולוגיות בטכניון: שמעון מרום, נעמה ברנר, רון מאיר ונועם זיו, על העונג בשעות ארוכות של דיונים מרתקים בנושאים העומדים במרכזו של מאמר זה, לשמעון מרום ולנעמה ברנר על הערותיהם למאמר, ולאילנה ושקד בראון על עצותיהן המועילות ותמיכתן

רוצים לדעת יותר?

The Missing Gene, Psychiatry, Heredity, and the Fruitless Search for Genes; Jay Joseph, Algora Publishing, New York, 2006

Biology As Ideology, Richard C. Lewontin, Harper Collins, 1991

The Origin of Order, Stuart A. Kauffman, Oxford University Press, 1993

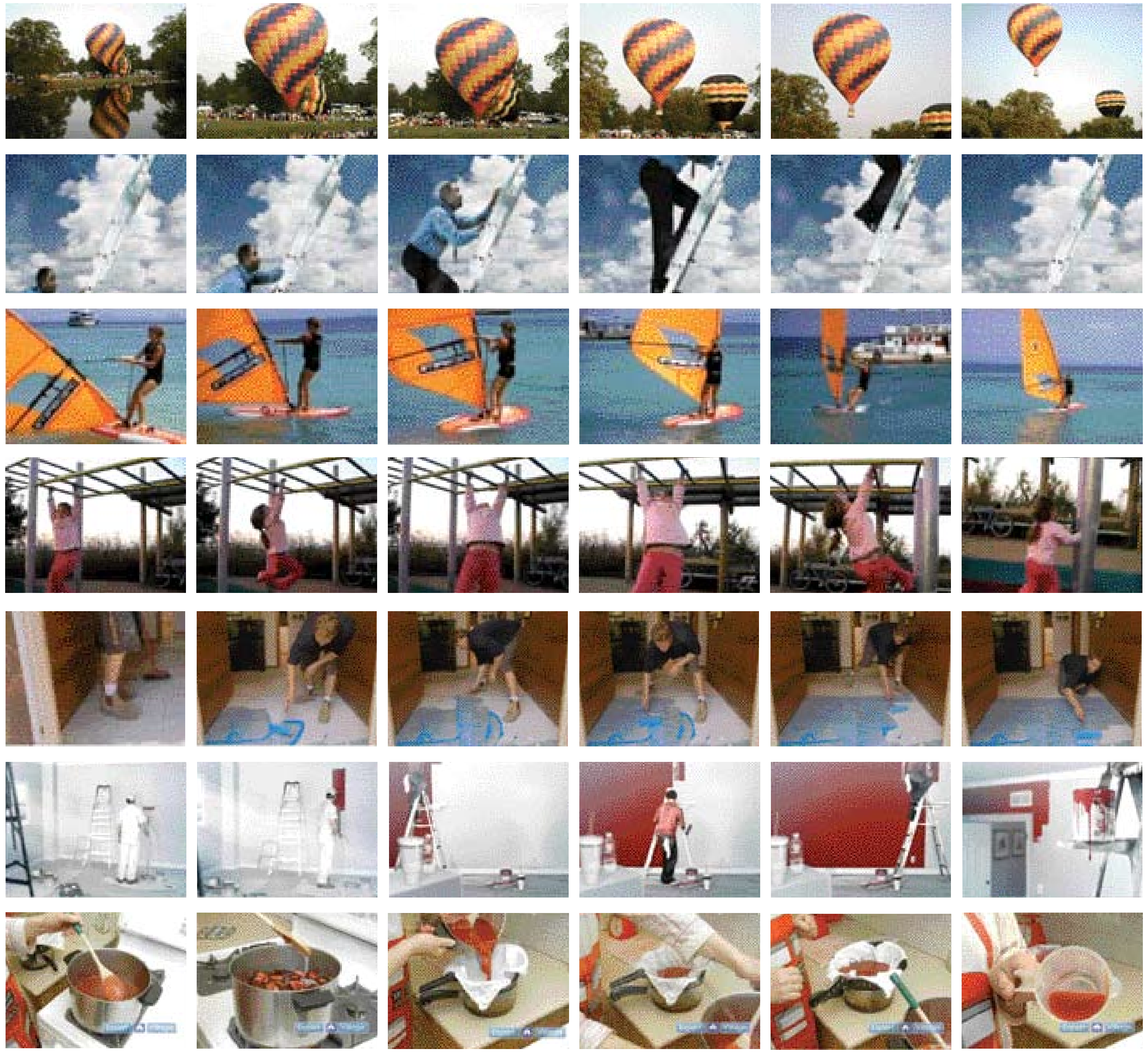
אבולוציה בארבעה מימדים, חוה יבלונקה ומריון לאמב, הוצאת עם עובד

Endless Forms Most Beautiful: The New Science of Evo Devo, Sean B. Carroll, Norton & Company 2005

רותם חרמון

לחשוב מילים או לדבר תמונות

האם אנו זקוקים לשפה טבעית כדי לחשוב? מה קודם – השפה או החשיבה? האם תיתכן חשיבה באמצעות תמונות בלבד? עדויות מרתקות של אוטיסטים על תהליכי החשיבה המיוחדים שלהם רומזות על אופני חשיבה לא "לשונית" ועל מגוון של מערכות ויזואליות הלוקחות חלק בפעילות הקוגניטיבית



■ אחד הנושאים המרתקים והמתסכלים בחקר התודעה הינו הקשר שבין השפה למחשבה, או בניסוח אחר, התפקיד שממלאת השפה (אם בכלל) בתוך מנגנוני החשיבה. זהו נושא מרתק בשל המקום המרכזי שתופסת השפה בחיינו, ובשל הקשר האינטואיטיבי-כמעט שאנו נוטים לייחס לשפה ולמחשבה. הוא מתסכל בגלל המעגליות החמקמקה של הניסיון לבחון את המחשבה ואת השפה מתוך עצמם. נושא זה, מלווה את הפילוסופיה מתחילת דרכה, כשבמרכזו מחלוקת בין שתי גישות עיקריות. גישה אחת טוענת כי המחשבה קודמת לשפה, והשפה משמשת רק לתקשורת ולביטוי של מחשבות. גישה שנייה גורסת כי השפה קודמת למחשבה – אין מחשבה ללא שפה, וניתן להסביר באופן מלא את החשיבה כפעולה לשונית.

במהלך המאה ה-20 מתחזקת העמדה כי השפה נוטלת תפקיד חשוב ומרכזי בתהליכי החשיבה. כיום נוטה הדיון הפילוסופי לצמצם את העיסוק לחשיבה התכוונותית, כלומר מחשבות שניתן לנסח כטענות אודות העולם ("אורי חושב שהכדור הוא עגול"). חשיבה כזו, נטען, מתבצעת בסוג מסוים של שפה. מתקיים ויכוח סביב השאלה על איזה סוג שפה מדובר. האם זו השפה אותה אנו דוברים (השפה הטבעית), או שמא שפה מיוחדת המשמשת לחשיבה בלבד? בלי להיכנס להיסטוריה ולעומק הדיון, הוויכוח מתנהל בין שתי גישות מרכזיות:

הפילוסוף האמריקני ג'רי פודור (Jerry Fodor) פיתח את תיאוריית "שפת המחשבה" (LOTH – Language Of Thought Hypothesis), לפיה המערכת עליה מתבצעים תהליכי החשיבה היא שפה פנימית מיוחדת, מעין "שפת מכונה" של המוח, אותה מכנה פודור "מנטליז". ההנחה כי שפת המחשבה שונה מהשפה המדוברת, מאפשרת להסביר באמצעות מודלים חישוביים גם תהליכים קוגניטיביים אצל יצורים שאינם דוברים שפה (תינוקות ובעלי חיים). כמו כן, טוען פודור כי אנו זקוקים לשפה בכדי ללמוד שפה. תהליך הלמידה דורש מראש מערכת סמלים כלשהי שתקיים את התהליכים הדרושים ללמידה. אנו זקוקים לשפה ראשונית "צרובה" במוח, שתאפשר לנו את היכולת ללמוד שפה טבעית. כך ששפת המחשבה, לפי פודור, היא שפה מולדת ולא נלמדת, הקודמת לכל שפה אחרת.

מהצד השני של המתרס נמצא הפילוסוף פיטר קרות'רס (Peter Carruthers), אשר מבקש להגן על העמדה לפיה החשיבה האנושית מתבצעת בשפה הטבעית. עמדה זו מסתמכת רבות על אינטרוספקציה – התבוננות פנימית על אופן החשיבה. התבוננות כזו וכן עדויות שעולות ממחקרים קוגניטיביים שונים מראים כי מחשבות הן ייצוגים פנימיים של משפטים בשפה הטבעית. קרות'רס אינו טוען כי כל החשיבה מתבצעת בשפה, אלא רק חלק ממנה – החשיבה ההתכוונותית **המודעת**. תהליכים לא מודעים יכולים להתבצע באופנים אחרים. לטענתו יתכן כי תהליכי חשיבה אצל יצורים ללא שפה מתבצעים בשפת מחשבה פנימית, כמו גם תהליך הלימוד של שפה ראשונה. על בסיס יכולת חשיבה ראשונית זאת נבנית אצל בני אדם בוגרים חשיבה מסדר גבוה יותר. זוהי החשיבה המודעת, והיא יכולה להתקיים באמצעות שימוש בשפה המדוברת.

פודור אומר כי כדי להבין מה התמונה אמורה לייצג, אנו זקוקים להסבר בשפה (איך תיראה תמונה שמייצגת את הטענה "אובאמה הוא נשיא ארצות-הברית"? ומה יבדיל בין תמונה כזו לתמונה שמייצגת את הטענה "אובאמה הוא שחור"?). קרות'רס טוען שדרוש מידע מוקדם ומילולי כדי להעביר את מלוא המשמעות של המושג אשר מיוצג בתמונה (איך תיראה תמונה של "דמוקרטיה" או של "אתמול"? האם משמעות המושג "בית-ספר" מסתכמת במראה הבניין?)

"ככל שהמילה קשה יותר לייצוג ויזואלי, כך קשה יותר ללמוד אותה. כדי להבין מושגים אבסטרקטיים, צריך לתרגמם לסמלים ויזואליים. המושג 'כנות', למשל, מתורגם לתמונה של אדם אשר מניח ידו על ספר תנ"ך בבית משפט"

לצד החוויה המוכרת של "דיבור פנימי" קיימת גם חוויה נפוצה אחרת – **תמונות העולות במחשבה**. גם פודור וגם קרות'רס מחזיקים בדעה כי ייצוגים ויזואליים יכולים לשמש רק כאמצעי משלים אשר מתקיים במקביל לחשיבה בשפה. **תמונות אינן יכולות למלא את מקום השפה לצורך קיום תהליכים מסוג החשיבה ההתכוונותית.** טענתם העיקרית נוגעת לחוסר היכולת של תמונות לשאת משמעות סמנטית ללא הזדקקות לשפה.

האם אכן תמונות אינן יכולות לשמש כ"שפה בחשיבה התכוונותית"? עדויות מעניינות עולות מתוך דיווחים של אנשים אוטיסטים, או כפי שהם מכנים עצמם, א"סים (אנשי הספקטרום האוטיסטי). עדויות אלה מציגות צורות חשיבה **לא-מילולית** אשר מעמידות בספק עמדות כגון אלה של פודור וקרות'רס, ודורשות מאיתנו לבדוק שוב את תפיסותינו לגבי הקשר בין השפה למחשבה. העדויות אינן רבות, אך אפילו מעט העדויות הקיימות מספקות לנו הצצה יוצאת דופן למרחב האפשרויות המופלא של המוח האנושי.

סרטי וידיאו המוקרנים בראש

ד"ר טמפל גרנדין אובחנה בילדותה כאוטיסטית. היא בעלת תואר שלישי במדעי בעלי החיים, ואחראית לתכנונם של חלק גדול מהמתקנים המשמשים לטיפול בבעלי חיים בארה"ב. גרנדין כותבת רבות על האופן הוויזואלי בו פועלת החשיבה שלה, לו היא מייחסת את ההבנה

>>

>> הייחודית שלה אודות בעלי חיים. מתוך ניסיון להבין מה מייחד את צורת החשיבה של אנשים אוטיסטים שוחחה גרנדין עם מאות אוטיסטים וחילקה את צורות החשיבה שמצאה לשלוש קטגוריות עיקריות (היא גם מציינת כי מעבר להיות כולן לא-מילוליות, כמעט כל צורת חשיבה אוטיסטית היא ייחודית):

חשיבה **ויזואלית**: חשיבה בתמונות. אופי התמונות משתנה מאדם לאדם (לעיתים דוממות, לעיתים תלת-ממדיות ונעות).

חשיבה **יחסית**: אנשים אלה אינם רואים תמונות, אלא תבניות ויחסים (בין מספרים, צלילים או יחסים במרחב).

חשיבה **לוגית**: באמצעות מערכת סימנים פרטית.

"רוב האנשים, במידה כזו או אחרת, חווים גם מחשבות בתמונות, צלילים, יחסים מרחביים ועוד. יתכן מאוד כי אצל כולנו נוטל חלק בתהליכים הקוגניטיביים, מעבר לשפה, מגוון של מערכות אשר מאפשר סוגים שונים של חשיבה, שלכל אחת יכולותיה שלה"

גרנדין עצמה מתארת את החשיבה שלה **כסרטי וידאו אשר מוקרנים בתוך ראשה.** המילים עבורה הן שפה שנייה – כשמישהו מדבר אליה, המילים מתורגמות במוחה לתמונות. על הסרטים שהיא רואה יכולה גרנדין להפעיל תהליכים יצרניים כדי לייצר מחשבות חדשות.

גרנדין מפרטת את הקשיים של אדם בעל חשיבה ויזואלית בהתמודדות עם השפה המדוברת. היא אומרת כי המילים הקלות ביותר ללימוד הן שמות עצם, מכיוון שהן ניתנות לייצוג ישיר על-ידי תמונות. ככל שהמילה קשה יותר לייצוג ויזואלי, כך קשה יותר ללמוד אותה. כדי להבין מושגים אבסטרקטיים צריכה גרנדין לתרגמם לסמלים ויזואליים. המושג "כנות", למשל, מתורגם אצלה לתמונה של אדם אשר מניח ידו על ספר תנ"ך בבית משפט.

למילות יחס מרחביות (כמו "מעל" ו"מתחת") לא היתה משמעות עבור גרנדין עד שלמדה להצמיד להן תמונה (עד היום כשהיא שומעת את המילה "מתחת" היא רואה עצמה מתחת לשולחן בבית-הספר במהלך תרגול של התגוננות מהפצצה אווירית). מילות קישור מהוות עבורה בעיה. כילדה, השמיטה גרנדין מילים כמו "is" ו-"the" כיוון שהיו חסרות משמעות, וגם כיום ההטיה "to be" היא חסרת מובן עבורה. כאשר היא קוראת, מתרגמת גרנדין את הטקסט לסרטים מנטאליים, אולם

מתקשה לתרגם טקסט שאינו בעל משמעות קונקרטית. כך למשל היא אינה מצליחה להבין לעיתים ספרים בפילוסופיה או מאמרים שעוסקים בתחזיות עתידיות אבסטרקטיות.

מושגים כלליים מהווים גם הם מכשלה. השלב הראשון בהבנתם, אומרת גרנדין, הוא ללמוד ליצור קטגוריות ולהתאימן למידע חדש. כילדה, הבחינה גרנדין בין כלבים וחתולים לפי גודל. הסיווג נכשל כששכניה קיבלו כלב קטן. היא נאלצה למצוא מאפיין ויזואלי חדש, וגילתה שלכל הכלבים יש אף בצורה מסוימת.

טוני לנגדון הוא איש מחשבים מאוסטרליה המאובחן כאוטיסט. לנגדון מתאר אופן חשיבה ויזואלי שונה משל גרנדין. תהליך החשיבה שלו מכיל "אובייקטים" – מרכיבים ויזואליים שמייצגים רעיונות, מושגים או עצמים; ו"פעולות" – מרכיב שיכול לתאר תנועה, טרנספורמציות לוגיות או תהליך. מחשבה עבור לנגדון היא תמונה

שמורכבת משילוב של אובייקטים ופעולות. את הזיכרון שלו מתאר לנגדון כמאגר מובנה של התנסויות. המידע במאגר הוא ברובו ויזואלי ומקושר ברשת של קישורים הדדיים. המידע נשמר בצורה "מכווצת" – מידע חדש אינו נשמר במלואו, אלא במידת האפשר בתור קישורים למידע שכבר קיים במאגר. לנגדון מציין כי אופן זיכרון זה מגביל אותו בזכירת פרטים מדויקים של התנסויות.

אמאנדה באגס היא אוטיסטית בתפקוד נמוך. היא משוללת כישורי דיבור, אך משתמשת בכתיבה במחשב לתקשורת, וכן יוצרת סרטוני וידאו המתארים את עולמה. באגס מתארת צורת חשיבה מרחבית המכילה יחסים בחלל רב-ממדי. זהו אוסף גדול ולא-ויזואלי של מיקומים במרחב. לכל מיקום יש תכונות איכותיות וכמותיות. מחשבה עבורה היא "מפה" של מיקומים כאלה במרחב.

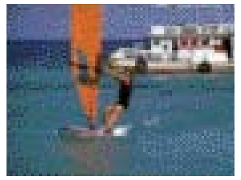
תוכנה בתוך המוח

רונן גיל הוא איש מחשבים ישראלי המאובחן כבעל תסמונת אספרגר. בשיחות שניהלתי איתו מתאר גיל צורת חשיבה העושה שימוש

במערכת של סימנים לוגיים, שהתיאור הקרוב ביותר אליה היא שפת תכנות.

האם אתה יכול לתאר את תהליך החשיבה שלך?

אני לא ממש יכול לתאר את אופן החשיבה שלי במילים (בעיקר היות וזהו מעין תרגום כשלעצמו), אבל אני חושב שהדבר הכי קרוב שקיים בעולם החיצון (העולם שאיננו הפנימיות שלי או מחוץ למה שנהוג לכנות – בעיקר מתוך חוסר הבנה ובורות – הבועה שלי) שיכול לתאר את תהליך המחשבה שלי, הוא סימנים לוגיים. אולם דבר זה שונה לא רק בין אוטיסטים למי שאינם אוטיסטים, אלא אף מאוטיסט לאוטיסט.



איך היית מתאר את השימוש שלך בשפה הטבעית? האם יש לשפה מקום בחשיבה או שהיא משמשת אך ורק לתקשורת חיצונית?

לשפה, במובן המקובל של המילה, אין שום מקום בתהליך החשיבה שלי. בכל פעם שאני צריך להעביר את מחשבותיי מתוך עולמי אל העולם החיצון (בעיקר לצרכי תקשורת עם אחרים), על תוצרי מחשבות אלה לעבור עיבוד נוסף (הדומה במהותו לתרגום) לשפה. את התהליך עצמו לא ניתן לתרגם כלל. אך את התוצרים, לעיתים כן. אין זה משנה כלל אם זה לעברית, לאנגלית, לערבית או לכל שפה אחרת. בתהליך התרגום משפה חיצונית לשפתי

הפנימית, בכדי לבצע תהליך מחשבה, ישנו תרגום עבור מילים. ישנו גם, אם כי במידה מוגבלת ביותר, תרגום של משפטים שלמים. אבל תרגום זה נעשה רק כאשר אני נוכח כי התרגום של כל מילה בנפרד יכול להוביל למספר תוצאות הסותרות אחת את השנייה. תרגום כזה מוגבל בדרך כלל למשפטים אשר אני יודע, על סמך הניסיון, שאינם באים לבטא את הכוונה שמאחורי המילים עצמן. דוגמה מאוד בולטת לכך היא השאלה "מה שלומך?". בשאלה הזו ישנם אלמנטים חברתיים, שאינני יכול להבחין בהם ולכן אני נדרש לתרגם את המשפט כולו ולא רק את המילים המרכיבות אותו.

האם היית מתאר את החשיבה שלך כמתבצעת בסוג של שפה פנימית? האם תהליך החשיבה כולל את היכולת להשתמש באלמנטים בסיסיים (סוג של מילים) כדי להרכיב אלמנטים מורכבים יותר (שהם כמו משפטים)?

אני לא נוהג להתייחס אל הגורמים בתהליך המחשבה שלי כאל שפה, אלא כאשר אני נדרש לדבר אודותיהם. המילה הקרובה ביותר לתיאור הגורמים בתהליך המחשבה שלי היא שפת תכנות. אני סבור, שזו אחת הסיבות המרכזיות למשיכתם של אוטיסטים רבים אל עולם המחשבים. הדבר הכי קרוב בחיי היומיום

של האדם המודרני בעולם החיצון לתהליך המחשבה שלי, הוא תוכנה מורכבת ביותר. זו תוכנה שאין לה מטרה ייעודית מלבד תוצר המחשבה (והמטרה של המחשבה הספציפית). יש ב"שפה הפנימית" שלי סימנים פשוטים המרכיבים סימנים מורכבים יותר. ובכך זה דומה לאותיות, הברות, מילים, משפטים, פסקאות וכן הלאה. רק שבשפה לא יכולתי ללכת עוד הרבה מעבר לזה, בעוד שבתהליך המחשבה שלי, זה הרבה-הרבה יותר מורכב וארוך. תוצר המחשבה מאוד דומה לפונקציה המובנית RETURN בשפות תוכנה. הוא יכול להחזיק רק את הסימן הסופי של התהליך והוא יכול להכיל תהליך שלם בעצמו. אולם, בכל מקרה בו אני נזקק לסימן הסופי ואינני זוכר את התהליך שהוביל אליו, אני חייב לחזור על כל התהליך בכדי להשתמש בתוצרו של התהליך. לעיתים, במהלך חזרה שכזו, מתגלה שגיאה בתהליך הראשוני שהובילה לתוצר שגוי. ואז, בעת החזרה על התהליך, משתנה גם התוצר הסופי.

עדות נוספת ואנקדוטלית משהו ניתן למצוא במכתב שכתב אלברט אינשטיין

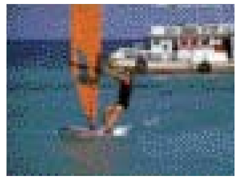
למתמטיקאי ז'ק הדמארד בשנת 1945, בו הוא מתאר את החשיבה שלו כוויזואלית-סימבולית:

"**לשפה או למילים, אם כתובות או מדוברות, אין תפקיד בתהליך החשיבה שלי. הישויות הנפשיות שמשמשות כמרכיבים בחשיבה הן סימנים או תמונות, ברורות יותר או פחות, הניתנים לשכפול ולשילוב באופן רצוני. משחקי השילוב הללו הם המאפיין המרכזי של מחשבה פורה, עוד לפני כל קשר להבניה לוגית במילים או בסימנים כלשהם שניתן למסור לאחרים**".

בכל העדויות הללו השפה המדוברת מתפקדת כשפה שנייה המשמשת לתקשורת חיצונית בלבד, ולא כשפה "טבעית". החשיבה המתוארת, שהיא בהחלט מודעת והתכוונותית, מתנהלת במערכות סימבוליות השונות באופן מובהק מהשפה המדוברת, ביניהן גם מערכות ויזואליות. הקשיים הקוגניטיביים המלווים את <<

״גרנדין עצמה מתארת את החשיבה שלה כסרטי וידאו אשר מוקרנים בתוך ראשה. המילים עבורה הן שפה שנייה – כשמישהו מדבר אליה, המילים מתורגמות במוחה לתמונות. על הסרטים שהיא רואה היא מפעילה תהליכים יצירתיים כדי לייצר מחשבות חדשות״

>> האוטיסם (קושי ביצירת מושגים כלליים והבנת מושגים אבסטרקטיים), כמו גם היתרונות (יכולת התכנון של גרנדין) מוסברים על-ידי האופי המיוחד של החשיבה האוטיסטית. הסבר



כזה מצביע על קשר בין המדיום בו מתבצעת החשיבה לבין היכולות הקוגניטיביות שהוא מקנה.

התמונה המצטיירת מתוך עדויות אלה דורשת מאיתנו לחשוב מחדש על הקשר בין השפה למחשבה. ניתן לשרטט לאורה השערה ראשונית, לפיה תהליכי חשיבה אמנם מחייבים מערכת מייצגת עליה הם מתקיימים, אולם כי יש יותר מאפשרות אחת למערכת כזו. קיימות מערכות ייצוג שונות אשר יכולות לתפקד כמדיום לחשיבה. המערכת הנפוצה ביותר היא המערכת הלשונית. אולם במקרים מסוימים - כמו באוטיזם - אם בשל ליקוי במערכת הלשונית או בשל ״חיווט״ שונה של המוח, יכולה מערכת אחרת לתפקד כמערכת המייצגת של החשיבה. זו יכולה להיות כנראה אחת מהמערכות הזמינות במוח, כמו המערכת הוויזואלית, השמיעתית, המרחבית וכדומה.

ההבדלים ביכולות הייצוג של המערכות השונות גורמים הבדלים ביכולות הקוגניטיביות שמתאפשרות על-ידן.

אפשר להניח כי תופעה זו אינה ייחודית רק למקרים כמו אוטיזם. חלק גדול מהחשיבה אמנם מתבצע בשפה, אולם רוב האנשים, במידה כזו או אחרת, חווים גם מחשבות בתמונות, צלילים, יחסים מרחביים ועוד. יתכן מאוד כי אצל כולנו נוטל חלק בתהליכים הקוגניטיביים מגוון של מערכות אשר מאפשר סוגים שונים של חשיבה, שלכל אחת יכולותיה שלה. הבנה טובה יותר של אפשרויות החשיבה הזמינות לנו חשובה לא רק לצרכים אינטלקטואליים, אלא במיוחד בתחומים מעשיים כמו חינוך. אז נוכל אולי לפתח מרחב לימודי גמיש ופלורליסטי, שלא יתמקד רק בלמידה מילולית, אלא ייתן מקום למגוון רחב יותר של יכולות המחשבה האנושית. ■

rotem.hermon@gmail.com

רותם חרמון הוא מהנדס תוכנה בעל עניין בטכנולוגיה ובהשפעותיה על האדם והחברה.

רוצים לדעת יותר?

על תיאוריית שפת המחשבה, מתוך אנציקלופדית סטנפורד לפילוסופיה –
http://plato.stanford.edu/entries/language-thought/

רונן גיל על השימוש בשפה –
http://aci.selfip.org/blogs/ronen/?p=11

טמפל גרנדין על חשיבה ויזואלית –
http://www.grandin.com/inc/visual.thinking.html

טוני לנגדון על חשיבה ויזואלית –
http://members.optusnet.com.au/tlang1/acdocs.htm

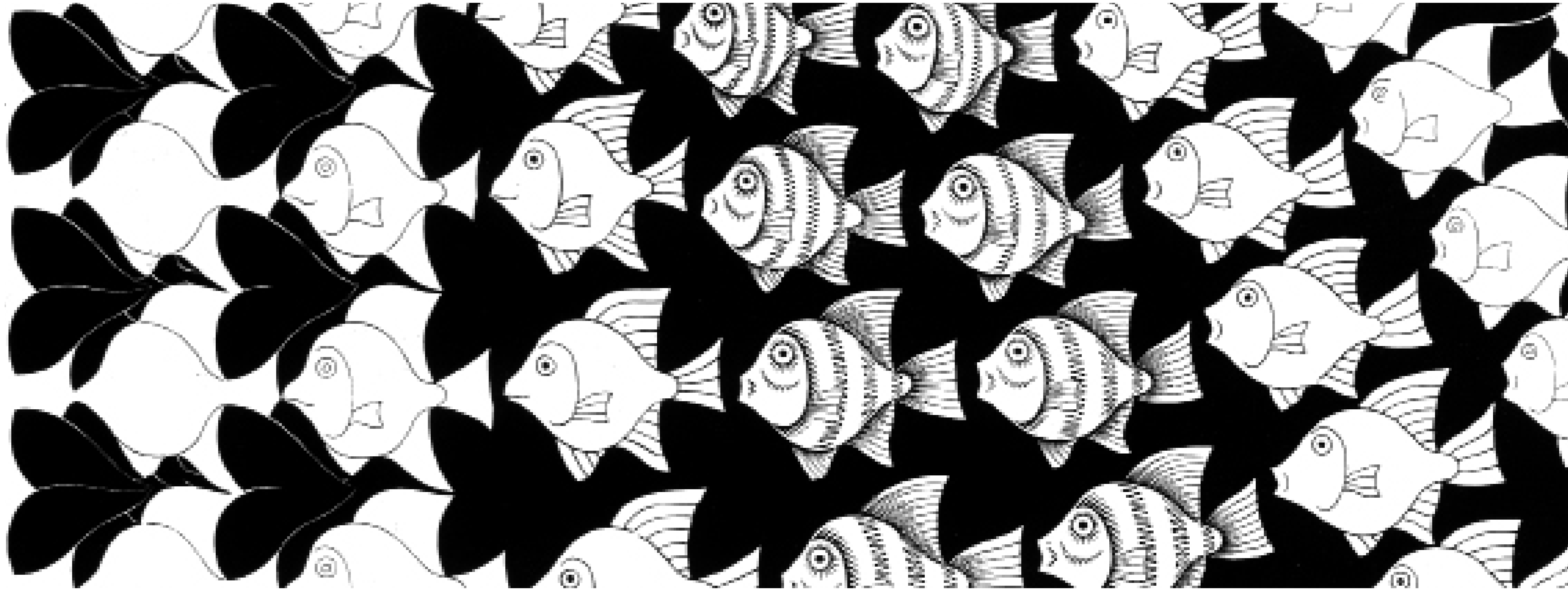
אמאנדה באגס על חשיבה מרחבית –
http://www.autistics.org/library/spatial.html

רפאל מלאך

"השאלה היא מדוע המציאות הפיזית כה טבעית וקלה לתפיסה כאשר אנו עוסקים בפיזיקה בממדים אנושיים (כמו זו של ניוטון), אך היא מצטיירת כמוזרה ובלתי נתפסת כאשר אנו עוברים לממדים הקטנים ביותר (מכניקת הקוואנטים), או לממדים הגדולים ביותר (תורת היחסות)"

מפוטונים לפנטזיות

האם מוחנו תופס את המציאות כפי שהיא שם בחוץ, או שאנו מייצרים תמונות וירטואליות המותאמות לצרכי ההישרדות שלנו? מחקרי המוח, כמו גם תיאוריות פסיכולוגיות, מציעים ראיות משכנעות לטענה שאנו בונים במוחנו עולם פנימי ללא קשר הכרחי למציאות. פרופסור רפי מלאך מחבר בין דרכי הבניית תמונות על־ידי המוח לתורת הקוואנטים ולשאלת הגוף והנפש



מ.ק. אשר מטאמורפוסה II The M.C. Escher Company-Holland. All rights reserved ©2009 www.mcescher.com

■ ממצאים שהתקבלו לאחרונה בחקר מוח האדם מעלים תוצאה מפתיעה: יצירת דימויים מנטאליים (תמונות ראייתיות) היא תהליך פנימי המתרחש בתאי העצב של המוח (נוירונים) ואינו מייצג בהכרח את המתרחש בעולם הפיזי החיצוני. התוצאות הללו עולות בקנה אחד עם מסורת ארוכה בתחום הפסיכולוגיה של החושים, הטוענת כי הדימויים שאנו רואים נוצרים במוחנו בתהליך של סימולציה פנימית החיונית לתפקודנו, אך לעיתים קרובות אינה קשורה למידע הפיזי שסביבנו. אנו יוצרים במוחנו את מה שאנחנו רואים.

תיאוריה כזו נוגדת את האינטואיציה שלנו, ובהמשך אציג חלק מהממצאים ומהמחקרים התומכים בנכונותה. אם אכן זה מה שמתרחש במוחנו, אני רוצה לטעון כי לשתי בעיות יסוד מרכזיות במדע – זו של פרשנות מכניקת הקוואנטים וזו העוסקת בבסיס הפיזי של התודעה (שאלת הדואליזם או הבעיה הפסיכו־פיזית) – יש מכנה משותף. לשתיהן צריך ואפשר להתייחס לאו דווקא כבעיות מדעיות, אלא כבעיות של תפיסה אנושית.

ניסוי "שני החריצים"

ב"תחרות" על תואר הניסוי היפה ביותר בתולדות הפיזיקה הגיע למקום הראשון ניסוי "שני החריצים" של ורנר הייזנברג.

הניסוי הקלאסי של תורת הקוואנטים. קיר ובו שני חריצים ובצידו האחר לוח פוטוגרפי. מקור האור פולט רק פוטון אחד בכל פרק־זמן נתון לכיוון הקיר. התוצאה המפתיעה שחשף הייזנברג היא שפוטון מתנהג גם כגל וגם כחלקיק

הניסוי מצטיין באלגנטיות ויש בו משמעויות עמוקות העוזרות להבנתנו את טבע המציאות הפיזית, אבל תוצאתו נוגדת את ההיגיון שלנו מאחר והיא סותרת את הציפיות

>>

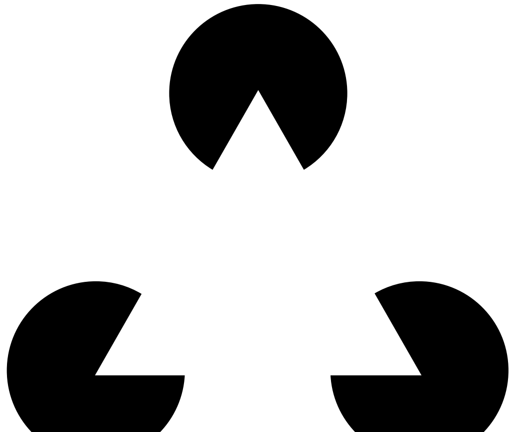
האינטואיטיביות והשכל הישר. אנו נוטים לראות בפוטון (חלקיק יסודי) חלקיק יחיד הנע במסלול מסוים, מתברר שהחלקיק הזה "עובר" בדרך כלשהי בשני החריצים בעת ובעונה אחת!

התופעה כונתה גם "בעיית הכפילות של גל החלקיקים". חלקיקים יכולים לגלות בעת ובעונה אחת מאפיינים של גלים המתפשטים במרחב וגם של חלקיקים הממוקמים בנקודה מוגדרת בחלל. כל ניסיון להבין את תיאוריית הקוואנטים בדרך אינטואיטיבית, נכשל. יש לנו קושי לתפוס את המציאות הפיזית האובייקטיבית כפי שהיא נחשפת ברמת המיקרו – בחלקיקים הקטנים ביותר.

בעיית תפיסה דומה מתרחשת כאשר אנו עוסקים באובייקטים גדולים במיוחד – במרחקים ובמהירויות כפי שהם מתגלים באמצעות תיאוריות היחסות הפרטית והכללית. קשה לנו לתפוס אינטואיטיבית את אופיו ותכונות המרחב והזמן שחשף אינשטיין. העובדה ששני אירועים עשויים להיראות לצופה המשקיף עליהם כאילו הם מתרחשים בעת ובעונה אחת, ולצופה אחר נדמה שהם נפרדים זה מזה בזמן, כמו גם הרעיון שאפשר "לעקם" את המרחב אינה נתפסת.

רק ברמת הביניים, זו של הפיזיקה הניוטונית, שבה הפרופורציות הן "אנושיות", קל לנו לתפוס את התופעות הפיזיקליות. האינטואיציה שלנו מתיישבת בלא קושי עם העולם הפיזי כאשר אנו מסבירים אותו על־פי התיאוריות של ניוטון.

חוקי הפיזיקה קיימים בכל קנה מידה, מהחלקיקים הקטנים ועד למרחבי היקום. אי־היכולת האינטואיטיבית שלנו לקלוט אותם בתחומים מסוימים, אינה קשורה לטבע ולמציאות, אלא דווקא ליכולת התפיסה שלנו – לתחום ההכרה והקוגניציה האנושית. לכן, השאלה היא מדוע המציאות הפיזית כה טבעית וקלה לתפיסה כאשר אנו עוסקים בפיזיקה בממדים אנושיים (כמו זו של ניוטון), אך מצטיירת כמוזרה ובלתי נתפסת כאשר אנו עוברים לממדים הקטנים ביותר (מכניקת הקוואנטים), או לממדים הגדולים ביותר (תורת היחסות).



איור 1: משולש קניז'ה: אין משולש

האם המציאות הפיזית אובייקטיבית?

אילו נערכה תחרות על תואר הניסוי האלגנטי ביותר בחקר התפיסה האנושית, הייתי בוחר באשליה החזותית היפהפייה בפשטותה אך מנוגדת לכל כללי האינטואיציה, זו המכונה "משולש קניז'ה" (ראה תרשים 1).

"המשולש" הזה הוא אשליה. הוא נוצר על־ידי שלושה עיגולים נפרדים, שמהם נגזרות צלעות משולש, אך עם זאת הוא יוצר רושם של משולש שלם. העניין העמוק העולה מן האשליה הזאת הוא שלמרות שלא קיים משולש פיזי על המסך, לא על פני השטח או בדפוסי הפוטונים הנקלטים בעינינו, המערכת החושית שלנו מבטלת את המידע הפיזיקלי הנכון – אין במציאות שום משולש – ויוצרת במקומו דימוי חזותי שגוי של משולש הכולל פני שטח וקווי מתאר. במילים אחרות, "משולש קניז'ה" מוכיח לנו את העובדה המוזרה כי מה שאנו רואים אינו עולה בהכרח בקנה אחד עם המציאות האובייקטיבית שמחוצה לנו. במקרה זה, מה שאנו רואים אפילו

"כל מגוון התוצאות בניסויים אלה מוביל למסקנה המנוגדת בצורה קיצונית לאינטואיציה שלנו. בעקרון, איננו רואים את העולם החיצון – אנחנו יכולים לראות רק את הדימויים שאנו יוצרים במוחנו. כיוון שדימויים אלה אף פעם אינם שיקוף נאמן של המציאות, אין טעם בניסיון לשער כיצד נראית באמת המציאות כשלעצמה"

עומד בסתירה למציאות האובייקטיבית. הדימויים שאנו "רואים" הם יצירה פנימית, מעין המצאה של תאי העצבים במוח הוויזואלי שלנו.

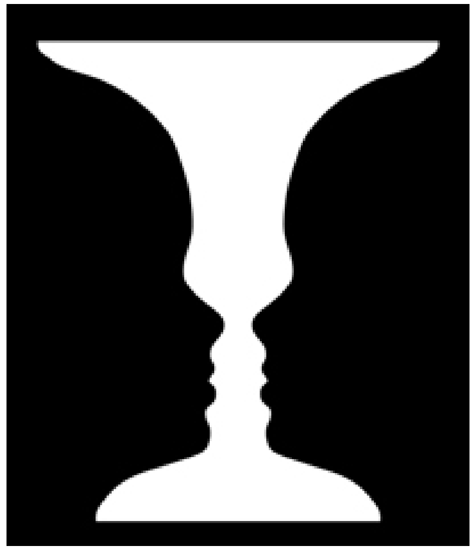
הינתקות מהמציאות הפיזית היא תופעה שכיחה

בשלב זה עלולים קוראים אחדים למחות ולומר שהטענות מרחיקות הלכת הללו מפריזות בערכו של "משולש קניז'ה" הצנוע. אולי, הם עשויים לטעון, בתנאי מעבדה מיוחדים אנו יכולים "להוליך שולל" את העין, אך במצבי יום־יום טבעיים אנחנו רואים את מה שקיים בשטח, הלא כן?

ראשית, בכל תיאוריה מדעית די להביא דוגמה נגדית אחת כדי למוטט את המבנה התיאורטי. לכן, אם התיאוריה גורסת שהראייה שלנו מייצגת במדויק מציאות פיזית אובייקטיבית, ממוטט "משולש קניז'ה" את הטיעון הזה בהוכיחו, כי יכול להיות מצב שבו יש לנו תמונה ברורה (משולש) העומדת בסתירה גמורה למציאות הפיזית החיצונית (שבה אין משולש).

מעבר לכך, מסורת ניסויים ארוכת ימים שהחלה בעבודה הקלאסית של הרמן פון־הלמהולץ ושל פסיכולוגיית הגשטאלט, הניבה אינספור דוגמאות שכולן הוכיחו את התופעה הבסיסית: מה שאנחנו רואים אינו מהווה ייצוג של העולם החיצון, אלא דגם אוטונומי הנוצר בתוכנו פנימה. עבור המדענים העוסקים בתחום, זו תופעה כמעט מובנת מאליה.

לדוגמא, תמונות פיזיות מסוימות, כגון אשליית פני האגרטל הידועה של רובין (תרשים 2), מביאות ליצירת דימויים חזותיים לא קבועים, **דמויות דו־משמעיות**, הנעות בין "פרשנויות" שונות (שני פרופילים שחורים או אגרטל לבן) למרות שהדגם הפיזי (הגירוי האופטי) נותר קבוע. אנחנו יכולים גם "לבנות" כרצוננו את יצירת הדימוי החזותי במוחנו על־ידי כיוון תשומת הלב הרצונית שלנו להיבטים שונים של התמונה. המחשה



איור 2: האגרטל של רובין: הראייה משתנה הפיזיקה לא

דרמטית לפער בין המציאות האובייקטיבית והראיה התגלתה במכון ויצמן על ידי ד"ר יורם בונה ופרופ' דב שגיא – באשליה הנקראת "עיוורון מושרה תנועה". באשליה זו עיגולים צהובים נעלמים לגמרי עקב תנועה של ענן ברקיע – למרות שאופטית העיגולים אינם משתנים כלל.

אחת הדוגמאות הבולטות לפער בין הראייה שלנו למציאות האובייקטיבית אפשר למצוא בקבוצת דימויים המכונה "**עצמים בלתי אפשריים**". כאן מחוללת מערכת הראייה שלנו דימויים תפיסתיים לא־פיזיקליים במובהק (ראו איור 3 בעמוד הבא). כלומר, הם אינם יכולים להתקיים או לשקף את המציאות הפיזית. העניין החשוב ביותר הוא שלמרות שהדימויים הללו מפרים באורח בוטה אפילו את הכללים הגיאומטריים־פיזיקליים הפשוטים ביותר, מסוגלת מערכת הראייה שלנו ליצור את הדימויים הללו בלי קושי, והם נראים אמיתיים וברורים ככל דימוי אחר. רק כאשר אנו מיישמים את החשיבה הלוגית הלא־חזותית שלנו, אנו מגיעים למסקנה הקוגניטיבית (גם היא לא־חזותית), שלא ייתכן שדימויים כאלה קיימים במציאות. פער זה בין הראייה והמציאות ריתק גם מספר ציירים כגון אשר, סלבאדור דאלי ורנה מגריט, שהטמיעו תובנות אלה בעבודותיהם.

הניתוק בין מנגנוני ראייה במוח למציאות הפיזיקלית

אפשר לטעון, שההוכחות שראינו עד כה לאופייה היצירתי של התפיסה החזותית אינן אלא דוגמה לאופי המסתורי והמעורפל של התופעות הפסיכולוגיות בכלל. אבל מחקרים בנושא מנגנוני התפיסה במוח האדם מחזקים ומאשרים את הפער בין התפיסה למציאות ואת העובדה כי המוח מייצר תמונות משלו.

לאחרונה נערכו מחקרים בתחום הרשתות הנוירונליות (עצביות) הקשורות לתפיסה החושית במוח האדם. נעשה ניסיון לבדוק את ההתאמה בין פעילות המוח למידע הפיזי החיצוני. שוב ושוב עלה מן הניסויים כי הפעילות המתרחשת במרכזי ראייה בקליפת המוח (המרכזים האחראים על התפיסה החושית) עשויה להיות מנותקת לחלוטין מהמציאות הפיזית.

למשל, בניסוי של הדמיית מוח שערכנו בשיתוף עם ד"ר אורי חסון הוצגו לנבדקים תמונות "דו־משמעותיות" בדומה לתמונה של רובין (ראה איור 2), שבה אנו "מייצרים" תמונות שונות (אגרטל או פרצופים) למרות שהגירוי האופטי נשאר קבוע. התגלה שפעילות תאי העצב במרכזי ראייה הקשורים לתפיסת פרצופים עלתה וירדה בהתאם לתמונה שיצרו הנבדקים במוחם. כשהנבדקים ראו את הפרצופים עלתה הפעילות, וכשהם ראו את האגרטל – ירדה הפעילות. כל זאת למרות שהגירוי האופטי הפיזיקלי שהגיע לעיניים כלל לא השתנה!

דוגמה מאלפת נוספת לדיסוציאציות כאלו אפשר למצוא בהצגת תמונות שונות לשתי העיניים, היוצרת תופעה המכונה "יריבות דו־עינית", שבה הדמות החזותית משתנה בצורה דינמית בין התמונות. גם תהליך זה הוא אוטונומי למערכת הראייה, כיוון שהגירויים הפיזיים שמגיעים לעיניים כלל אינם משתנים ונותרים כפי שהיו. בניסוי הדמיית מוח של נבדקים

>> בתנאי יריבות־עינית הוכח בצורה שאינה משתמעת לשתי פנים, שמרכזי המוח הנקשרים עם התפיסה החזותית פועלים ומשתתקים בהתאמה מלאה לתמונה הראייתית הנוצרת במוחו של הנבדק, **ובניגוד** למציאות הפיזית הקבועה.

ולבסוף, דוגמה דרמטית במיוחד לאופי העצמאי של תהליכי תפיסה המתרחשים במוח האדם. בניסוי שערכנו בשיתוף עם הגר גלברד-שגיב, פרופ' יצחק פריד מאוניברסיטת יו.סי.אל.אי. ואחרים – הצלחנו להראות שאפילו **עם סילוק של כל גירוי חזותי חיצוני**, כאשר אדם נזכר בדימוי כלשהו (אפילו בחושך) מגלים הנוירונים במוח האדם יכולת ראויה לציון של "שחזור מחדש" של אותם דפוסי פעילות שהיו להם בזמן חשיפה לגירויים אופטיים. להדגמה כיצד פעילות תא עצב במוח האדם "משחזרת" חוויה מנטאלית ללא כל גירוי מבחוץ ראה: http://www.youtube.com/watch?v=ySCyFEyuYrw

כל מגוון התוצאות בניסויים אלה מוביל למסקנה המנוגדת בצורה קיצונית לאינטואיציה שלנו. בעיקרון, איננו רואים את העולם החיצון – אנחנו יכולים לראות רק את הדימויים שאנו יוצרים במוחנו. כיוון שדימויים אלה אף פעם אינם שיקוף נאמן של המציאות, אין טעם בניסיון לשער כיצד "נראית באמת" המציאות כשלעצמה.

נכון, קשה לקבל את הרעיון הזה. בחיי היום־יום אנו חיים באשליה שהדימויים שאנו רואים נוצרים כתגובה אוטומטית לנעשה בעולם בלי כל מאמץ מצידנו. הדימויים החזותיים מרגישים כאילו הם קיימים בפועל שם בחוץ. מה שמקבע את האשליה הזאת הוא שאין לנו כל קושי לכאורה להעלים את העולם החזותי. כל שעלינו לעשות הוא לעצום את העיניים. כך נוצרת תחושה חזקה שהדימויים חייבים לבוא מבחוץ ולא ממבנים פנימיים כלשהם הנוצרים בתוך מוחנו.

אלא שבחינה דקדקנית של העובדות מעלה שוב תמונה מורכבת יותר. כך למשל, בדרך כלל כשאנחנו עוצמים את עינינו, העולם החזותי במוחנו נותר כשהיה. כך קורה פעמים רבות ביום כשאנחנו ממצמצים. העובדה שהעולם אינו מאפיל בכל פעם שאנחנו ממצמצים היא הוכחה נוספת לנתק הקיים בין הראִייה לבין המציאות הפיזית. ניתן להראות שהדבר לא נובע מכך שהמצמוצים הם קצרים מטבעם, גם עצימת העיניים למשך זמן ארוך יותר אינה מונעת את נוכחות הדימויים החזותיים, כפי שאנו חווים מדי לילה בזמן החלום. אפשר שזו ההוכחה הדרמטית ביותר לכך שדימויים חזותיים עשויים להיווצר בלי קשר למציאות חיצונית אובייקטיבית.

כל העובדות הללו מביאות אותנו למסקנה בלתי נמנעת: התפיסות החזותיות שאנו חווים הן "יצירה" פנימית של המוח, ואינן אלא סימולציה משוערכת בלבד, או דגם מקורב של העולם הפיזי האובייקטיבי.

מה אנחנו רואים?

המסקנה אכן נשמעת מנוגדת לכל הגיון ומעלה לפחות שלוש שאלות מתבקשות.

הראשונה: **אם מה שאנחנו רואים אינו העולם האמיתי, מה אנחנו רואים?**

השנייה: **אם המציאות שאנו מייצגים היא רק מציאות משוערת – כיצד קורה שאנחנו מיטיבים לתפקד במציאות האובייקטיבית, שלכאורה אנו עיוורים לה?**

השלישית: **אם אנו יוצרים את הדימויים החזותיים בכוחות עצמנו בלבד – כיצד קורה שבמקרים רבים אנחנו רואים את הדברים באותו אופן?**

התשובה לשאלות הללו, כמו לרוב שאלות היסוד בביולוגיה, מתייחסת בהכרח ליסודות החשיבה הביולוגית – היינו, לתיאוריית האבולוציה באמצעות הברירה הטבעית מבית היוצר של דרווין.

על־פי תיאוריית האבולוציה אפשר להסביר את כל התהליכים הביולוגיים ככלים שאפשרו את הישרדות הפרט. אם ניישם עקרון בסיסי זה לתפיסה החזותית, נוכל לומר שהתפיסות החזותיות שלנו נוצרות על־מנת לאפשר לנו תפקוד אופטימלי והישרדות בעולם הפיזי. כדי לאפשר לנו לתפקד בעולם כראוי, חייבות המערכות החושיות שלנו בכלל, ומערכת הראייה בפרט, ליצור מודל מעשי (או היעיל ביותר לצרכינו) של המציאות הפיזית. מודל שכזה חייב לאפשר לנו לתפקד בצורה תקינה, אבל אינו צריך בהכרח לייצג במדויק את המציאות החיצונית.

אפילו להיפך. כדי שנבטיח יכולת הישרדות אופטימלית, מבני התפיסה שלנו אינם יכולים להרשות לעצמם להיות עותק מדויק של הפרמטרים הפיזיים, שכן דיוק כזה בולם לא אחת פעולה מהירה ויעילה על סמך מידע חושי דו־משמעי ולוקה בחסר. כך למשל, כדי להבטיח תפקוד מהיר, הדימויים החזותיים שאנו יוצרים חייבים כמעט תמיד להתרחק מהייצוג הנכון של המידע ולהסתמך על "קיצורי דרך" ועל ניחושים טובים, שהם פרי הניסיון שלנו והציפיות שאנו בונים כלפי הסביבה.

מסקנה: **מערכת הראִייה שלנו אינה עוסקת בקליטה מדויקת של מה שנמצא בעולם הפיזי, אלא בבניית מודל של מציאות חיצונית המועיל להישרדותנו ומאפשר לנו לתפקד ביעילות בעולם.** וריאציה של רעיון זה ניתן למצוא כבר אצל גדול הפילוסופים המודרניים, עמנואל קאנט, אשר הציע ב"מהפכה הקופרניקאית" שלו את הרעיון שאנו תופסים את העולם על־פי "המסננת או המשקפיים" שלנו ולא בצורה שהוא קיים כשלעצמו. כלומר, האדם משליך מקטגוריות פנימיות שלו על המציאות שהוא בונה.

עכשיו נוכל לחזור לתחילת המאמר, לפיזיקת הקוואנטים ותורת היחסות, ולהבין מדוע האינטואיציה מכזיבה אותנו ברגע שאנו מתרחקים מה"ממדים" היומיומיים שלנו וגולשים לתחום הקטן (קוואנטום) או הגדול (תורת יחסות). הממדים הללו "שונים מהחיים" ופשוט אינם מועילים בפועל לפעילות היומיומית ולכן גם לא להישרדותו של המין האנושי. וממילא אין טעם שמנגנוני המוח ייצרו עבורנו דימויים חושיים (או יפתחו אינטואיציות המבוססת על התפיסה החושית) על סמך הממדים הלא־מעשיים הללו.

התשובה לשאלה הראשונה – מה משקף העולם החזותי שלנו? – היא, אם כן, שהוא משקף מודל פרגמטי של אותם היבטים של העולם הפיזי הנחוצים להישרדות. למערכת החושית של האדם אין לכן בשום פנים ואופן "מטרה" של יצירת **ייצוג מדויק** של המאפיינים האובייקטיביים של העולם הפיזי.

תפיסת הראִייה האבולוציונית מסבירה גם את השאלה השנייה, הנוגעת ליעילותה של מערכת הראייה בחיי היומיום שלנו. דווקא משום שהמערכת הזאת אינה מנסה לתאר את המציאות כהווייתה, בצורה נכונה ומדויקת, אנו יכולים לשרוד טוב כל־כך בעולם. אילו היה המצב שונה, כלומר אילו שיקפה מערכת הראייה באמת את העולם הפיזי על כל פרטיו, היינו נכחדים.

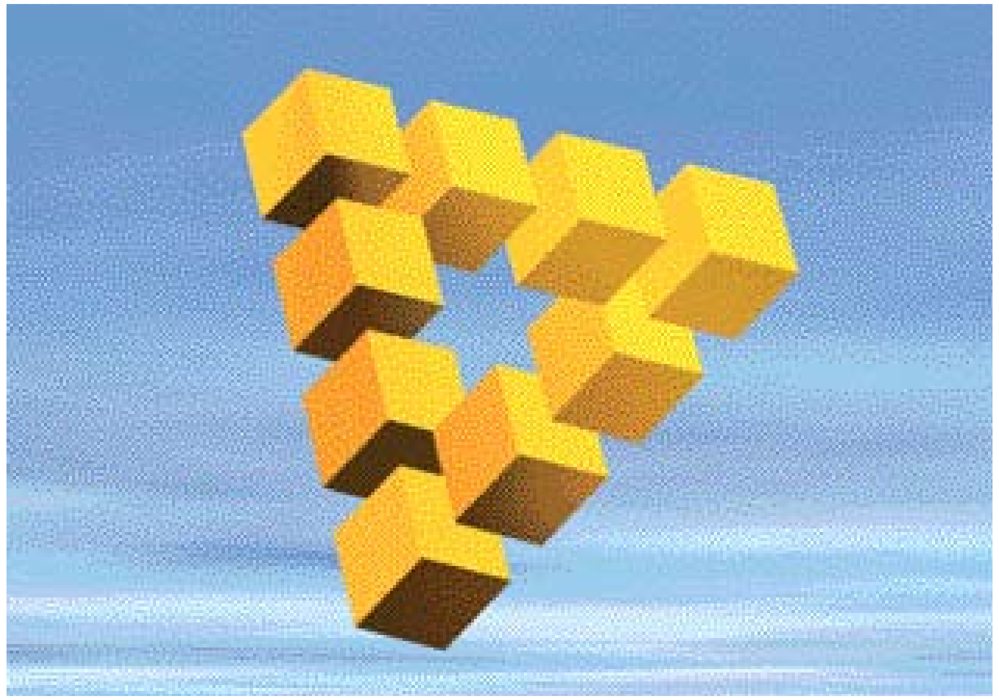
ולשאלה השלישית: כיצד קורה שיש לנו חוויות חושיות משותפות רבות כל־כך, המקובלות ומוסכמות על כולנו? ראשית צריך לזכור, שלמרות שנדמה שיש לנו חוויות חושיות משותפות, יש גם דוגמאות רבות לכך שלא זה המצב. דוגמה פשוטה לכך אפשר למצוא בעניין הדימויים הדו־משמעיים (האגרטל והפנים). אם שני צופים יבחנו את הדימויים הללו בעת ובעונה אחת, הדעת נותנת שכל אחד ואחד מהם יעבור בין "פרשנות" אחת לשנייה בזמנו־הוא ובקצב שלו.

במישור מעשי יותר אכן נראה שאנחנו יוצרים דימויים חזותיים דומים בתנאים סביבתיים פיזיים דומים – משום שאנו יצורים דומים (בעלי מטען גנטי ואורח חיים דומה), החולקים את אותם צרכי הישרדות ולחצים אבולוציוניים, ועקב כך מפתחים מערכות ראייה הנוטות לחולל סימולציות זהות של המציאות. העניין המכריע הוא, שאל לנו לטעות בתגובות המשותפות הללו ולייחס אותן למציאות חיצונית אובייקטיבית, בדיוק כשם שלא יעלה על דעתנו לראות במקרה של היסטריה המונית, שהיא מעין "הסכם" משותף לרבים, הוכחה לכך שהיא עולה בקנה אחד עם אמת אובייקטיבית כלשהי.

עכשיו נוכל לבחון אם אופני התפיסה החזותית שלנו קשורים לחידתיות של מכניקת הקוואנטים והבעיה של גוף־נפש. גם אם לא אתיימר לפתור את הבעיות המופלאות הללו אשר מעסיקות כבר דורות של מדענים, ברצוני לטעון שמבחינת התפיסה החושית שאותה הצענו כאן, יש לשתי הבעיות הללו היבטים משותפים, מסקרנים ומעוררי מחשבה.

מכניקת הקוואנטים: האם "קריסת" פונקציית הגל היא אשליה תפיסתית?

לרעיון שתפיסתנו החזותית מאפשרת לנו לתפקד היטב בעולם, אבל אינה מתארת אותו כפי שהוא, ניתן למצוא מאפיינים מקבילים במכניקת הקוואנטים. מכניקת הקוואנטים מצליחה לתאר בכלים מתמטיים את התנהגותם של חלקיקים יסודיים בדיוק שאין לו אח ורע בהיסטוריה של הפיזיקה. אך כל הניסיונות לבנות דגם אינטואיטיבי של תיאוריה כזו – "פרשנות מובנת אינטואיטיבית" – כשלו עד היום. לדעתי, אפשר לייחס >>



איור 3: עצמים בלתי אפשריים. הצורה באיור אינה יכולה להתקיים בעולם הפיסי. תמונה: Visual Photos

>> את הקושי לבנות פרשנויות קוואנטום כאלה לניתוק בין המציאות הפיזית לבין הדימוי המנטאלי של העולם שנוצר במוחנו.

נבחן לדוגמה בעיית יסוד בפרשנות של מכניקת הקוואנטים המכונה "קריסת" פונקציית הגל. מכניקת הקוואנטים מבוססת על מבנה מתמטי המכונה פונקציית הגל, המתייחס להתנהגותן של ישויות פיזיות כגון פוטונים ואלקטרונים בדיוק מדהים. למרבה הצער, לפונקציית הגל אין משמעות אינטואיטיבית. אי אפשר להסביר מה פירושה של פונקציית הגל.

בגליון "אודיסאה" 1 מסבירה פרופסור דורית אהרונוב בדיוק את עקרון הסופרפוזיציה המתואר כאן. מערכת קוואנטית יכולה להיות בשני מצבים בו־זמנית

ניתן למצוא לפונקציה זו מטפורה קרובה בכך שנטען כי לחלקיקים יסודיים כגון אלקטרונים אין מצב מוגדר (כגון תאוצה ומיקום), אלא הם פזורים כביכול על פני המרחב והזמן, ויש מידה של סבירות שהם יימצאו כאן או שם.

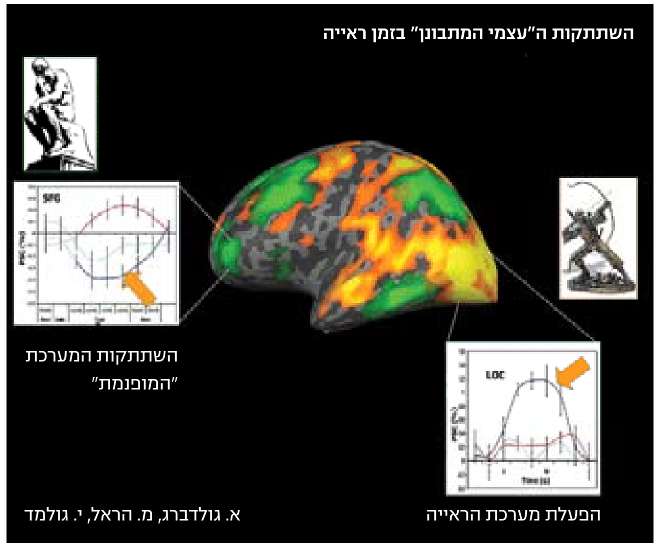
הבעיה היא שאנחנו לא מסוגלים לראות במוחנו התפלגויות כאלה של הסתברות או של פונקציית הגל של החלקיק. מה שאנו כן חווים הוא אירועים מוגדרים המתרחשים "באמת", למשל, זיק של אור. וכך, כאשר אנו רואים צבע אדום, החוויה לעולם לא תהיה תערובת (70% הסתברות אדום ו־30% הסתברות כחול), החוויה היא תמיד אחת והיא ודאית. כלומר בניגוד לעולם הקוואנטים, הדימויים החזותיים שלנו אינם הסתברותיים אלא ודאיים ומוגדרים ומהווים מהות יחידתית ברורה. קיים אם כן פער בין יכולת הדימוי שלנו לתיאוריה הקוואנטית.

ניסיונות לפרש את התנהגות הקוואנטים התמקדו עד כה בניסיון לגשר על הפער הזה שבין פונקציית הגל המופשטת המבטאת רק הסתברויות לבין מה שמכונה העולם הפיזי ה"קלאסי", הוודאי והמתאים לתפיסתנו.

המעבר הזה, מעולם של הסתברות לעולם של ודאות, כונה "**קריסת**" פונקציית הגל. קיימות פרשנויות רבות ומגוונות המתיימרות להסביר את הקריסה הזאת. בה־במידה, תיאוריות אי־קריסה למיניהן נדרשו לפרשנויות מסובכות של "עולמות רבים", שבהם המציאות נעשית ודאית באמצעות "שכפול" היקום כולו בכל פעם שמתבצעת מדידה של מצב הקוואנטים.

אלא שהפער העמוק והיסודי בין המציאות הפיזית לדרכי תפיסת מוחנו עשוי לספק לנו נקודת מבט שונה לבעיה. אם מה שאנו רואים אינו המציאות הפיזית, אלא "המצאה" פנימית משלנו, אזי בעיית מכניקת הקוואנטים הופכת לגילוי נוסף, דרמטי במיוחד, של הפער בין העולם הפיזי לעולם התפיסתי. כלומר ה"מוזרות" של הקוואנטים היא דוגמה מובהקת לרעיון, שאי אפשר לתאר או לראות, אפילו ברמה העקרונית, את המציאות הפיזית כפי שהיא קיימת באמת.

על־פי נקודת המבט שאני מציע, אין למעשה אף פעם קריסה בעולם הפיזי האמיתי. המציאות הפיזית נותרת תמיד מעין חפיפה של ההסתברויות. "קריסת" פונקציית הגל משקפת את המעבר מהמציאות הפיזית להתגבשותה של תפיסה חושית במוחו של המתבונן.



איור 4: יחסים אנטגוניסטים בין המערכת ה"מוחצנת" למערכת ה"מופנמת־עצמי" במהלך משימה של חוויה ראייתית חזקה. החיצים מצביעים על הפעלה גבוהה של הדמיית תהודה מגנטית באונה האוקסיפיטלית (בחלק האחורי) שבמערכת ה"מוחצנת", בניגוד לירידה בפעילות של המערכת ה"מופנמת־עצמי" בקדמת המוח. (מעובד מתוך (Goldberg et. Al. –6, Golland et. Al. 07

חשוב להבין שכאשר מתארת מכניקת הקוואנטים את הפיזיקה בממדיה האנושיים (גופים גדולים הבנויים מחלקיקים רבים), מתקרבת ממילא ההתנהגות המוזרה של הקוואנטים לפיזיקה הניוטונית ה"קלאסית", ולכן מבחינה מעשית, כלומר מבחינת היכולת ההישרדותית של האדם, נוכל להסתפק בסימולציה של העולם הניוטוני ולהתעלם בפועל מתופעות הקוואנטים.

אני טוען שכשם שאיננו יכולים לראות את המציאות הפיזית בכלל, כך איננו יכולים להבחין בהיבטי הקוואנטים שלה בפרט. עלינו לבחון את האופי המנוגד לאינטואיציה של מציאות הקוואנטים כבעיה של תפיסה אנושית, ולא כבעיה של הפיזיקה.

תיאוריות עצביות של התודעה

המצב מסתבך אף יותר כאשר אנו ניגשים לבחינת המוח והתודעה – כלומר הפער בין הפעולות הכימיות והפיזיות של המוח לתוצר של מחשבה ותודעה האנושית, ובלשונו של פרופסור ישעיהו ליבוביץ' – הבעיה הפסיכו־פיזית. למרות מאמצי מחקר נרחבים ומקיפים ולמרות כמות מרשימה של מידע על פעילות המוח על כל היבטיה – שוררת תחושה עזה שאנו מהלכים באפלה בנוגע לתיאוריות עצביות של התודעה, כלומר תיאוריות המנסות להסביר את הופעתה של החוויה המודעת במונחים של פעילות פיזיקלית של תאי העצב.

ברצוני לטעון שלפחות חלק מהבעיה נעוץ בכך שכאשר אנו מנסים לבנות תיאוריה של חוויה מודעת, כגון יצירתה של תמונה ראייתית, שוב אנו נוטים להסתמך על דגם העולם האינטואיטיבי הטבעי שלנו. הבעיה בחקר התודעה מתחילה באימוץ נקודת המבט הטבעית שלנו – **זו של מתבונן מן החוץ** המסתכל על תופעה כלשהי אשר נמצאת מחוץ לו. אנו כמובן משתמשים בנקודת מבט (פרספקטיבה) זו כשאנו מנסים להבין את פעילות המוח. כמדעני מוח למשל, אנו מתייחסים אל המוח כאל כל עצם פיזיקלי חיצוני. אנו מנסים להבין את תפקודו על־ידי מדידת התכונות הפיזיות שלו – כגון רמת הפעילות החשמלית, מבנה הקשרים בין תאי העצב וכיוצא באלה.

יתרה מזאת, כאשר אנו מנסים להבין את פעילות המוח, אנו נוטים לא אחת להשליך את נקודת המבט שלנו כצופים על רשתות המוח עצמן. כלומר, אנו נוטים להניח שמרכזי המוח גם הם כמונו, "מתבוננים" ומודדים את הפעילות של מרכזי מוח אחרים.

נטייה זו, להתייחס לפעילות חלקי המוח השונים כאל מעין "התבוננות" הובילה לפרדיגמה פופולרית ומצליחה בתחום מדעי המוח החושיים, שמנסה להבין את משמעותם של דפוסי הפעילות של תאי העצב באזור מוח אחד מנקודת מבטו של מרכז מוח אחר, שאליו נשלח המידע. אותו אזור "גבוה יותר" במוח מתבונן או "קורא" את דפוסי הפעילות הללו ומוסיף עליהם פרשנות משלו. בלשון מטפורית ניתן לומר כי אזור המוח שבו מתרחשת הפעילות העצבית הוא מעין מסך קולנוע, והאזור ה"גבוה" הוא מעין צופה המתבונן או קורא או מפרש את הפעילות על המסך. האזור הגבוה הקורא יוצר לכאורה את התודעה.

מאמצי חישוב ומחקר רבים הושקעו בניסיון לפענח את ה"צפנים" של "סרטי הקולנוע" הללו, כגון מהם הכללים שעל־פיהם נוצר דגם הפעילות של תאי העצב, והיכן וכיצד פועלים המנגנונים האמורים לקרוא את המידע שבו.

למרבה הצער, ממצאים שהתקבלו מניסויים שנערכו לאחרונה סותרים את הדפוסים האינטואיטיביים הללו. למשל במחקרים שערכנו בשיתוף עם אילן גולדברג, מיכל הראל ויוליה גולנד התגלה שבמהלך תפיסות חושיות רבות־עוצמה במיוחד, כאשר המוח ממוקד כולו ביצירת התמונה הראייתית – עושים מרכזי הפרשנות הגבוהים באונות הקדמיות, אשר היו אמורים להתבונן ולהביא את פעילות מרכזי הראייה אל המודעות, בדיוק את ההיפך מקריאה פעילה של המידע החזותי – הם מפסיקים לפעול! בכך הם מפקירים את מרכזי הראייה בצידו האחורי של המוח להתמודד לבדם עם משימת היצירה של התמונה הראייתית המודעת (ראה איור 4).

במושגים כלליים יותר, תיאוריה המבוססת על שרשרת של אזורים ה"קוראים" זה את זה, אולי תוכל להסביר את המעבר מהפעלה פיזיקלית של העין לתגובה התנהגותית שניתן למדוד אותה, למשל התכווצות האישון בתגובה להבזק של אור. אך כלל לא ברור כיצד אמורה התפיסה המודעת, אותה חוויה של "אני רואה", להיווצר משרשרת, ארוכה ככל שתהיה, של העברת מידע סדרתי מתא עצב אחד לשני.

הבעיה היא שההתנסות המודעת שלנו היא תופעה ייחודית שונה מכל מה שאנו מתבוננים בו או בוחנים בשגרת יומנו. חשוב להבין שכאשר יש לנו חוויה ראיתית או כל חוויה פנימית אחרת, מערכת פיזית (כגון המוח) מצליחה בדרך מופלאה להתבונן על מצבה־היא **מבפנים, מתוך עצמה**. אם הקוראים חשים אי־נוחות לנוכח רעיון מעורפל כזה, אין לי אלא להסכים איתם. צמיחתה של התנסות מודעת, כמו חווית הראייה, מתוך תהליכים פיזיים, היא מחוץ להישג ידה של האינטואיציה שלנו. מבנים מנטאליים, כגון תפיסה חושית, פשוט אינם מתאימים להתמודד עם פיזיקה מופלאה שכזו.

נדמה שכמו במכניקת הקוואנטים, גם כאן הבעיה נעוצה בניתוק שבין המציאות הפיזית, במקרה זה בתופעה שבה חומר (המוח) מתבונן אל תוך עצמו לבין יכולתנו ליצור דימוי מנטאלי של התבוננות זו. כמו במכניקת הקוואנטים, אל לנו להציב מטרה של בניית דגמים אינטואיטיביים של התהליכים המופלאים הללו. מוטב שנתמקד במציאת תיאוריה העשויה לפשט ולנבא את המגוון העשיר להדהים של התופעות המכונות התנסות מודעת או תודעה.

ספק אם נוכל להסביר תיאוריה כזו במושגים אינטואיטיביים, אבל אם משלימים עם נקודת המבט המוגבלת הזאת, ניתן לראות שכמות לא מבוטלת של ממצאים מניסויים שנערכו לאחרונה, ניסויים שנחשבו כרלוונטיים רק לבעיית תהליכי ההצפנה ועיבוד המידע המתרחשים במוח, מהווים למעשה התקדמות חשובה להגשמת היעד המרגש של מציאת תיאוריה מדעית לחווית הראייה בפרט ולתודעה האנושית בכלל. ■

rafi.malach@gmail.com

ברצוני להודות ל־ISF על המימון, להגר. גלברד־שגיב, רועי מוקמל, מיכל הראל, פרופ' יצחק פריד ואילן גולדברג על תרומתם לנתונים המוצגים כאן, ולעידן שגב על הערותיו המועילות.

רוצים לדעת יותר?

כמה ספרים נוספים בנושא:

על האספקט היצירתי של הראייה:

Eye and Brain by Richard L. Gregory.

על הקשר בין מוח ותודעה:

The Quest for Consciousness: A Neurobiological Approach by Christof Koch

A Universe Of Consciousness How Matter Becomes Imagination by Gerald Edelman and Giulio Tononi

על בעיות בפרשנות מכניקת קואנטים:

Quantum Enigma: Physics Encounters Consciousness by Bruce Rosenblum and Fred Kuttner

רן לוי

ניפגש בעוד עשרת-אלפים שנה

בעידן בו התרבות המערבית חושבת רק על "כאן ועכשיו", החליטה "אגודת העכשיו הארוך" להזכיר לנו שאין הווה ללא עתיד. פרויקט ה"שעון הארוך" נועד להזהיר את כולנו שאם לא נדע לחיות נכון את ההווה, יפסיק שעון המין האנושי לתקתק

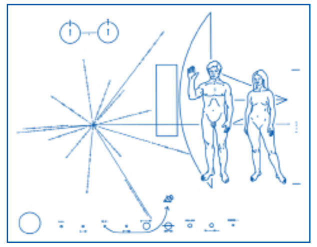
■ דני היליס אינו רגיל לכישלונות. חבריו מכנים אותו גאון, והרזומה שלו עשיר בהצלחות מרשימות: יזם טכנולוגי מצליח, טכנולוג ראשי של חברה גדולה בעמק הסיליקון, בוגר אוניברסיטת MIT היוקרתית וזו רק רשימה חלקית. אך ב־31 לדצמבר 1999, שעה אחת בלבד לפני שהמאה ה־20 הגיעה לסיומה ופינתה את מקומה למילניום חדש ומבטיח – עמד דני היליס בפני האפשרות הנדירה של כישלון. שלוש שנים קודם לכן חברו מספר מהנדסים, הוגי דעות, פילוסופים ואמנים כדי להקים את אחת האגודות המשונות והמרתקות שאי פעם נהגו: אגודת "העכשיו הארוך" (The Foundation of the Long Now). הרעיון מאחורי האגודה היה הרצון לקדם את התכנון והמחשבה לטווח ארוך. ה"טווח הארוך", לדידם, לא היו עשרים, שלושים או אפילו מאה שנים: 10,000 שנה, לא פחות. בעולם שבו מכשיר חשמלי שורד בקושי שלוש שנות שימוש, מחשבות מעין אלו דורשות שאר־רוח וחזון. חברי אגודת ה"עכשיו הארוך" ניחנו בשאר־רוח שכזה: אפילו את השנה בתאריך הם כותבים בחמש ספרות – 01999 – מתוך הבנה שארבע ספרות בלבד מגבילות את יכולת התכנון שלהם עד לשנת 9999 בלבד. דני היליס אמור היה להוביל את אחד המבצעים החשובים והמשמעותיים של האגודה – פרויקט "השעון הארוך".

מבט אל העתיד, היכולת לחשוב על העתיד, היא תכונה ייחודית לאדם. מרגע שהצליח האדם לפתח שפה, וככל שאנו מבינים, הוא היצור היחיד שמשתמש בשפת סמלים רחבה ומקיפה, נוצרה עבורו אפשרות של עתיד. האדם חושב קדימה, מתכנן את פעולותיו, מנתח את האלטרנטיבות האפשריות, וכאדם מודרני הוא מאמין שביכולתו גם לקבוע, או לפחות להשפיע ולשנות את העתיד. מחקרים ותצפיות בבעלי חיים מצביעים על כמה פעולות קצרות־טווח של תכנון וצפיית העתיד, בעיקר פעולות של אגירת מזון או תכנון אמצעי הגנה. פעולות אלו רחוקות מלהעיד על הכרה בעתיד או תכנון ומחשבה קדימה. רובן מבוססות על אינסטינקט קיום בסיסי. האדם היה ונשאר היצור היחיד שמסתכל וחושב קדימה.

בגיליון "אודיסיאה" 1, תיאר דודי גולדמן את האיגרת ששלחה האנושות אל יצורים תבוניים בחלל, שייתכן כי יחלפו מיליארדי שנים עד שנזכה לקבל עליה תשובה. חוני המעגל מספר על האיש שנטע עץ חרוב, שאת פירותיו יאכלו רק בני־בניו כעבור שבעים שנה. במצרים העתיקה נבנו מבני הענק של הפירמידות, שמתכנניהם ידעו שלא יזכו לראותם ושנבנו גם כאיתות ודו־שיח עם אנשי העתיד. כדי לחשוב עתיד, דרושים דמיון (תכונה אנושית בלעדית), מחשבה, שפה ויכולת הסקת מסקנות. ללא יכולות אלו ספק אם המין האנושי היה ניצב היום במעמד של שליט בטבע.

העתיד דורש חזון. העתיד דורש אמונה. העתיד דורש מאמץ של ויתור על "כאן ועכשיו" לשם מטרה לא ברורה. אין פלא לכן שהאדם הפוסט־מודרני מעדיף את ההווה. בספרו "מודרניות נזילה" טוען זיגמונד באומן כי המושג "ארוך טווח", אף כי עדיין אנו מתייחסים אליו מכוחו של הרגל, הוא קליפה ריקה חסרת משמעות. "קצר המועד" החליף את "ארוך הטווח" והפך את הרגע לאידיאל. התרבות הקפיטליסטית מקצרת את הטווחים, מאדירה את הארעיות, מחליפה את הדברים העמידים בדברים חולפים לשימוש מיידי. "זיכרון העבר והאמון בעתיד", אומר באומן, "היו שני עמודי התווך של התרבות האנושית, אולם האדם העכשווי חי בהווה, רוצה לשכוח את העבר ואינו מאמין בעתיד".

האגודה של ה"עכשיו הארוך" נלחמת במחשבה קצרת־הטווח. היא מייצגת את הרוח האנושית במובנה האידיאלי. חיבור בין העבר, ההווה והעתיד. ההחלטה שלהם לחשוב עשרת־אלפים שנה קדימה היא התרסה נגד הכאן והעכשיו. הפרויקט הסמלי הראשון שאותו



תכננו אנשי האגודה היה שעון יוצא דופן. דני היליס, המהנדס המחונן, הגה ותכנן את "השעון של העכשיו הארוך". מודל של השעון הזה אמור היה לפעול את פעולתו הראשונה בדיוק בסיום המילניום, ב־31 לדצמבר 01999.

מדובר בשעון שאורך חייו הוא 10,000 שנה. המספר הזה כל־כך גדול, עד שקשה לתפוס אותו לאשורו. הנה קנה־המידה: התרבות האנושית כולה – מאנשי המערה הראשונים ועד מעבורות חלל הממריאות בשאגה - קיימת כעשרת־אלפים שנה. דני היליס ביקש ליצור שעון שיתקתק משך זמן ארוך פי חמישה מהזמן שחלף מאז ישו, פי שתיים מהזמן שחלף מאז הוקמו הפירמידות.

מודל של חלק מהשעון הארוך
תמונה באדיבות "אגודת העכשיו הארוך" צילום: Rolfe Horn

"המושג 'ארוך־טווח', אף כי עדיין אנו מתייחסים אליו מכוחו של הרגל, הוא קליפה ריקה חסרת משמעות. 'קצר־מועד' החליף את 'ארוך־הטווח' והפך את הרגע לאידיאל. התרבות הקפיטליסטית מקצרת את הטווחים, מאדירה את הארעיות, מחליפה את הדברים העמידים בדברים חולפים לשימוש מיידי"

ימים ספורים לפני תום המילניום סיימו חברי הצוות ההנדסי של היליס לבנות את אב־הטיפוס הראשון של השעון: מודל מוקטן של הדבר האמיתי, אך עם זאת מכונה שאמורה לשרוד ולתקתק במשך 10,000 שנה. בכל אלף שנה, בדיוק בחצות הלילה, אמור השעון להשמיע שני צלצולים בלבד. היליס ידע ששנת 02000 תהיה ההזדמנות הראשונה והאחרונה שלו לשמוע את יציר כפיו משמיע שני צלצולים. אם טעה בתכנון, אם מישהו מהמהנדסים פספס פרט חשוב, הוא לא יזכה לשמוע את בן טיפוחיו מצלצל בימי חייו.

האתגרים בפני מי שמנסה לתכנן מכונה כה שאפתנית הם אדירים. על המהנדס להתמודד כנגד שני כוחות בלתי צפויים ובלתי מתפשרים: כוחות הטבע, וטבע האדם. מבין השניים הללו, טבע האדם הוא המסוכן והבעייתי ביותר.

מעגל הסטונהג' באנגליה נועד ככל הנראה לשמש כשעון המראה את היום הארוך בשנה ואת היום הקצר ביותר

חומרי הגלם מהם ייבנה השעון חייבים להיות פשוטים וזולים, כדי שלא לפתות את גנבי העתיד לפרק אותו לגורמים. הוא צריך להיות מוגן מפגעי מזג האוויר, רעידות אדמה ואסונות דומים. המנגנון שיפעיל את השעון צריך להיות פשוט להבנה וקל לתחזוקה, כדי שגם במקרה של מלחמת עולם שלישית והידרדרות תרבותית בחזרה אל תקופת האבן - יהיה מי שידאג לשיפוץ ותיקון. הוא צריך לשמור על הדיוק שלו במשך אלפי שנים, ולא פחות חשוב: הוא צריך להיות מובן. איש אינו מבטיח שבני האדם בעוד 5,000 שנה ישתמשו בלוח השנה הגרגוריאני ובתצוגת השעון הסטנדרטית המוכרת לכל אחד מאיתנו. שעון שלא ניתן להבין בו מהי השעה, פשוט אינו שעון.

לכל בעיה כזו כבר היה פיתרון שמצאו מהנדסים בתקופות קדומות. הפירמידות המצריות ומעגל הסטונהג' האנגלי שרדו ללא פגע במשך אלפי שנים, כמעט ללא נזק מעשי ידי אדם. המפתח לשרידות זו טמון בחומר הגלם מהם נבנו: אבן. זולה, פשוטה וחסרת ערך – האבן אינה מושכת שודדים ולכן נבחרה להיות החומר ממנו ייבנה השעון של ה"עכשיו הארוך".

מהפירמידות ניתן ללמוד גם את יתרונות המיקום: אזור יבש וצחיח, מבודד ובלתי נגיש. ארגון "העכשיו הארוך" קנה פיסת אדמה על פסגתו של הר גבוה במדבר נוואדה – אזור שומם ומרוחק, עליו יקום השעון המתוכנן. האפשרות השנייה, להחביא את השעון (באותו

>>

האופן שבו הוטמנו ונשמרו מגילות ים המלח), נפסלה על הסף: השעון חייב להיות גלוי כדי למלא את תפקידו.

הצורך בפשטות ובתחזוקה נוחה הכתיבו את הטכנולוגיה שבבסיס השעון: לא אלקטרוניקה מתוחכמת, כי אם מנגנון מתכתי ברור וקל להבנה. היליס החליט לבנות מחשב, אבל מכני. התכנון גאוני באלגנטיות הפשוטה שלו. לב השעון הוא דיסקת מתכת עגולה, שבתוכה מסתובבת זרוע מכנית כמו מחוג על פני שעון. על פני הדיסקה, באזור הפנימי שלה, טבועים סדרה של פינים שהם למעשה מספר בינארי: אם יש פין, הספרה היא 1, ואם אין – 0. המחוג המסתובב "קורא" את המספר (האופן המדויק שבו הוא עושה כן אינו משנה לצורך ההסבר), ואז "כותב" אותו על סדרה של פינים ניידים שנמצאים על היקף הדיסקה: הוא מפיל פינים או מרים אותם כדי לשכפל במדויק את המספר שקרא ממרכז הדיסקה. הפינים הניידים על ההיקף הם כמו תא זיכרון במחשב אלקטרוני, שתוכנו ניתן לשינוי.

בכל סיבוב שלם, כותב המחוג את המספר הקבוע אל תא הזיכרון שבהיקף ומוסיף אותו לתוכנו הקודם של התא: אם המספר המקורי הוא, למשל 3, אז בסיבוב הראשון יכיל תא הזיכרון 3, בשני 6, בשלישי 9 וכן הלאה. בשלב מסוים יתמלא תא הזיכרון עד אפס מקום: מבחינה מעשית, כל הפינים על היקף הדיסקה התרוממו. או אז מתקדמת תצוגת השעון צעד אחד קדימה ותא הזיכרון מתרוקן ומוכן לסיבוב נוסף. היתרון הגדול של תכנון כזה הוא בפשטות שלו ובדיוק הדיגיטלי הבלתי מתפשר שלו: אם פין כלשהו נשבר, הבעיה ניכרת לעין וקל להחליף אותו.

כדי לשמור על הדיוק לאורך השנים, נעזר השעון בשני מנגנונים המשלימים זה את זה. כריסטיאן הוייגנס, מתמטיקאי מוכשר שחי במאה ה־17, חקר לעומקה תגלית שגילה לפניו גליליאו גליליי. כשמטוטלת – חוט שקצהו האחד קבוע במקום ומשקולת מתנדנדת בקצהו השני – נעה סביב צירה, היא תמיד משלימה מחזור סיבוב שלם בפרק זמן קבוע. מחזוריות זו חיונית

"מדובר בשעון שאורך חייו הוא 10,000 שנה. הנה קנה־המידה: התרבות האנושית כולה - מאנשי המערה הראשונים ועד מעבורות חלל הממריאה בשאגה - קיימת כ 10,000 שנה. דני היליס ביקש ליצור שעון שיותקתק משך זמן ארוך פי חמישה מהזמן שחלף מאז נולד ישו, פי שתיים מהזמן שחלף מאז הוקמו הפירמידות"

כדי לשמור על דיוקו של השעון. הוייגנס הצליח לנצל את המחזוריות הקבועה של המטוטלת כדי לתכנן סביבה את שעון המטוטלת הראשון, שאנו נוהגים לכנות "שעון סבא".

המטוטלת תהיה גם במרכזו של שעון "העכשיו הארוך": היא מדויקת, אך אינה אמינה דיה. חיכוך ותזוזה עלולים לגרום לה לסטות מזמן המחזור הקבוע. שעוני שמש, לעומת זאת, אינם מדויקים (קשה לקרוא בהם את הזמן בדיוק רב), אבל הם אמינים: השמש זורחת ושוקעת בכל יום, ללא שינוי.

אמינותה של השמש היא המשלים הטבעי לדיוק של המטוטלת. בכל צהריים תחלוף השמש מעל השעון ועדשה מיוחדת תמקד את קרניה על פס מתכת זעיר. פס המתכת יתרחב בעקבות החום והתרחבות זו תספק אות למטוטלת (שוב, באמצעות מנגנון שפרטיו המדויקים אינם חשובים לענייננו), שלפיו תוכל להסתנכרן ולהתאפס בכל פעם. המכניזם הזה יהיה אמין מספיק, על־פי התוכניות, כדי לפעול גם אם במשך מספר שנים לא תוכל השמש לזרוח מבעד לעננים – בעקבות פגיעה של אסטרואיד בכדור־הארץ, לדוגמה.

כתחליף לתצוגת שעון סטנדרטית, נבחרה תצוגה המראה את מיקומם של כוכבי הלכת סביב השמש: כדורים קטנים המייצגים את כוכבי הלכת יסתובבו סחור־סחור במעגלים כך שמיקומם היחסי ישקף במדויק את מצבם באותו רגע בשמי הלילה. מתקדמת או מפגרת ככל שתהיה התרבות העתידית, סביר להניח שהמעקב אחר גרמי השמיים ישחק את אותו תפקיד חשוב ששיחק לכל אורך ההיסטוריה האנושית.

השעון של "העכשיו הארוך" נמצא כעת בשלבי תכנון סופיים, והצוות שבונה אותו פותר את הבעיות האחרונות לפני שיתחילו העבודות במדבר נוואדה. את המימון מספק מיליונר עלום־שם, וכל הסימנים מעידים על כך שילדינו ונכדינו צפויים להתפעל מפיסת טכנולוגיה שאפתנית זו במו עיניהם. אך האם גם נכדיהם של נכדינו, וילדיהם שלהם יזכו לך באלף הדורות הבאים? הרבה תלוי ביכולתנו להוריש להם עולם יציב, בטוח ובעל אקלים שיוכלו לשרוד בו. כדאי לנו להזדרז ולשפר את הטעון שיפור: השעון מתקתק.

בכנסת ישראל בוטלה מסיבות חיסכון מינהלת "נציב הדורות הבאים", שאמורה היתה לחבר בין מעשינו בהווה לתוצאותיהם והשפעותיהם על הדורות הבאים. אל גור והארגונים הירוקים בעולם נלחמים על הצלת כדור הארץ למען הדורות שיבואו. אנשי ה"עכשיו הארוך" מנסים להעביר בדרכם לחברי הכנסת הישראלים ולעולם כולו אתוס אנושי אחר – אתוס של עתיד, של המשכיות ושל חזון מאחד אנושי. אם לא נשכיל לחשוב קדימה, כולנו ניעלם. פרויקט ה"שעון הארוך" הוא סמל במאבק זה.

האם אתם סקרנים לדעת את תוצאות הניסוי של ליל המילניום, 01999? יש כאלה שחשבו ששני הצלצולים שהשמיע השעון היו אנטי־קליימקס למאמץ האדיר. עבור דני היליס, לעומת זאת, הם היו קול מן העתיד. סביר להניח, שלא היה מחליף את הצלצולים העמומים שנשמעו בשום דבר אחר. ■

ran.levi@gmail.com

רן לוי הוא מהנדס חשמל וסופר מדע פופולרי. סיפרו הראשון, "פרפטום מובילה: על פיזיקה, שרלטנים ומכונות נצח" יצא לאור ב־2007 בספריית מעריב

רוצים לצאת למסע? הצטרפו עכשיו

לרכישת מנוי:
טלפון: 052-9993111, 03-9411621 (24 שעות ביממה)
www.odyssey.org.il

אודיסאה

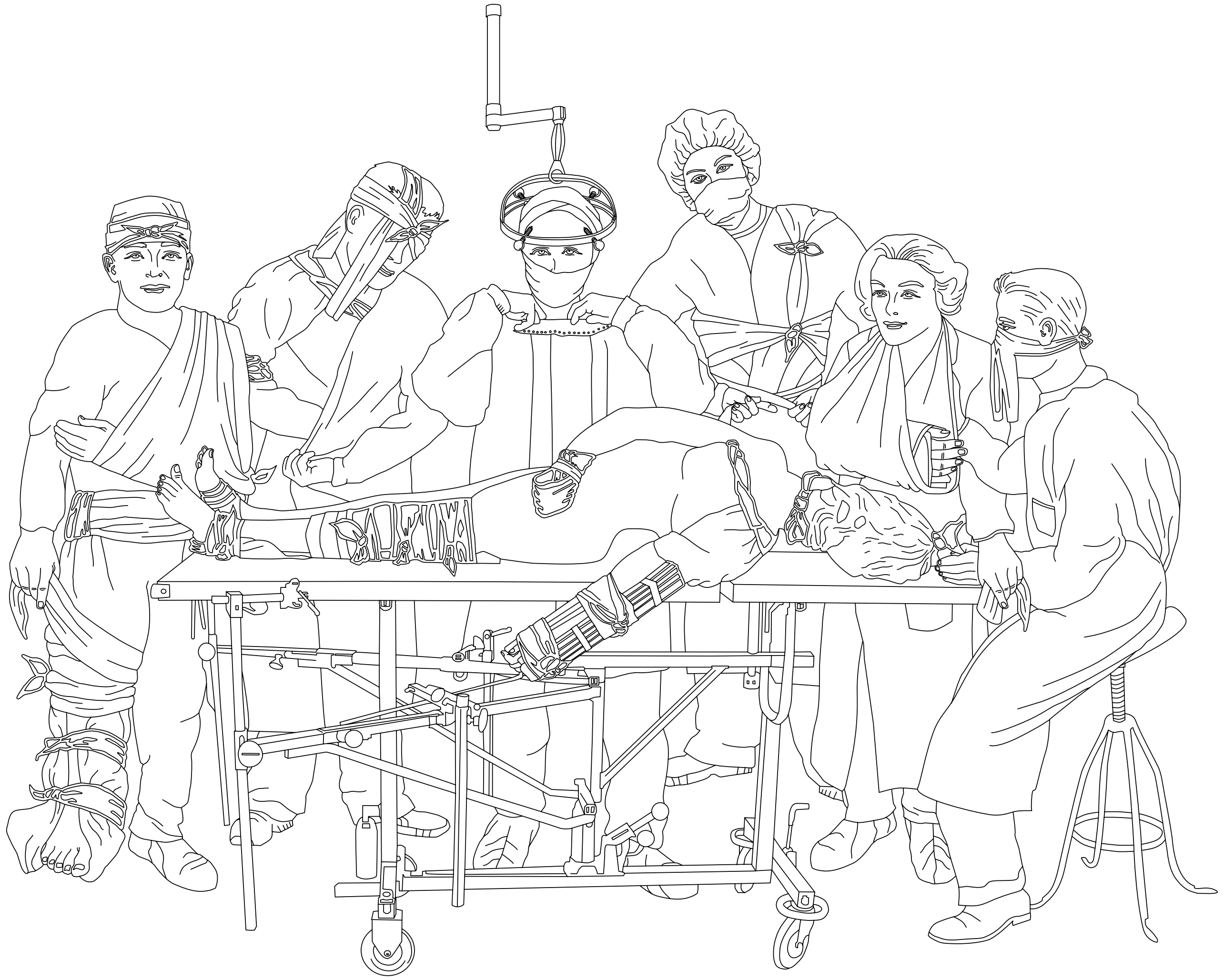
| מסע בין רעיונות |

"כִּי תֵצֵא בַּדֶּרֶךְ אֶל אִיתָקָה
שְׁאַל כִּי תֶאֱרַךְ דַּרְכְּךָ מְאֹד
מְלֵאָה בְּהַרְפַּתְקָאוֹת, מְלֵאָה בְּדַעַת"

(קונסטנטינוס קוואפיס, **איתקה**, תרגום: יורם ברונובסקי)

כתב־העת יגיע לתיבת הדואר בביתכם מדי שלושה חודשים.

מאמרים בתחומי המדע, פילוסופיה, טכנולוגיה, תרבות ואמנות,
פרי עטם של בכירי אנשי המדע ומיטב אנשי הרוח, התרבות והאמנות בישראל.



היענות (2005) compliance

חיים סידר ורזי גרינפלד / איורים: איה בן רון

"תאי גזע הם תאים שעדיין לא התחייבו לגורל ספציפי וכולם בעלי יכולת להפוך להיות כל סוג תא, בהינתן ההוראות הנכונות. הם בסיס ראשוני ליצירת עוד מיליוני תאים, כפי שגזע הינו בסיס שעל גביו צומח עץ רחב ענפים ועלים. מהלך של 'בקרה על ביטוי גנים' יקבע מה יהיה מסלול התפתחותו ותכונותיו של כל תא"

להתחיל מבראשית

משקיעים רבים נוהרים להשקיע בחברות העוסקות במחקר תאי גזע עובריים. אנשים מקפיאים תאי גזע להבטחת בריאותם. הבאז העולמי מדבר על תחום חדש, שישנה את פני הרפואה המודרנית ויאפשר בעתיד התערבות גנטית מתוחכמת. מהם תאי גזע? באיזה אופן ניתן לכוון את התפתחותם והאם אנו מותקדמים לעידן של רפואה מסוג אחר?

■ ההצהרה היתה חד־משמעית: **"אני מאמין כי ההגבלות שהטיל הנשיא בוש על מימון מחקר בתאי גזע אנושיים כבלו את ידיהם של המדענים שלנו ועיכבו את יכולתנו להתחרות באומות אחרות. כנשיא, אבטל את האיסור שהטיל הממשל הנוכחי על מימון פדרלי למחקר בתאי גזע עובריים"**. בעיצומו של קמפיין בחירות קשה וארוך, כאשר חיילים אמריקנים ממשיכים להיפגע בעיראק והכלכלה העולמית במגמת התרסקות, הקפיד ברק אובאמה, אז המתמודד הדמוקרטי לנשיאות, לבטא את עמדתו החד־משמעית בנושא שנראה לכאורה שולי וחסר חשיבות למרבית בוחריו.

מחקר תאי הגזע מסתמן בשנים האחרונות כחזית המחקר הגנטי העולמי; הבטחה תיאורטית גדולה לבריאות האדם ועתיד האנושות. תאי גזע הם קבוצת תאים ראשוניים שעדיין לא התמיינו (כלומר לא נקבע לאיזה סוג תא הם יהפכו בעתיד). הבנת המנגנונים העומדים בבסיס תפקודם והתפתחותם יאפשר את ניצול התאים הללו ליצירה ולחידוש רקמות ואיברים. ברחבי העולם עוסקים כיום אלפי חוקרים בפענוח התכונות המיוחדות של תאי הגזע ובניסיון להתערב בפעילות התאית הנורמלית על־מנת לכוון את התפתחותו בהתאם לצרכינו.

מול חוקרים ומדענים אלו, ממשיך ממסד שמרני ודתי להתנגד לכל התערבות גנטית ובעיקר למחקר תאי הגזע. הקבוצה הדתית מתנגדת בעיקר בשל האיסור להתערב במעשה הבריאה האלוהי, מתנגדים אחרים מנמקים את דעתם בשיקולים אתיים ופגיעה בכבוד האדם, יש המתנגדים מתוך חשש שהמחקר ינוצל למטרות הרסניות.

מה הם תאי גזע? מהן התכונות המאפיינות אותם ומדוע הם כל־כך מיוחדים? מה ידוע על המנגנונים שמכוונים את הוראות ההפעלה וההתמיינות של התאים? כיצד ולשם מה ניתן לנצל ידע זה?

על חלק מהשאלות הללו אנו רוצים לנסות ולענות במאמר זה. עיקר עיסוקנו מתמקד באפיגנטיקה – חקר המנגנונים הקובעים את גורל התא ועתידו. להבנה ולשליטה במנגנונים אלה יכולה להיות השפעה מכרעת על עתיד האדם והרפואה המודרנית.

כיצד אנחנו נוצרים?

בואו נחזור רגע להתחלה. כל יצור חי מתחיל את חייו כתא בודד ראשוני שנקרא זיגוטה. תא זה הינו תוצר איחוד של שני תאים נפרדים: תא זרע אותו תרם האב, ותא ביצית אותו תרמה האם. הזיגוטה מתחלקת

>>

>> לשניים ומתקבלים שני תאים זהים. שני התאים הללו מתחלקים אף הם וכן הלאה, עד לקבלת טריליוני התאים שיוצרים גוף חי בוגר. כל תא בודד מכיל בתוכו ספר הוראות: הדנ"א – החומר התורשתי, שמפרט את הוראות ההפעלה המדויקות ליצירת אורגניזם שלם, וכן את המידע להכנת כל סוגי החלבונים שהתאים השונים שייווצרו בהמשך יזדקקו להם במהלך חייהם.

תא הוא עולם ומלואו, מכשיר משוכלל ומתוחכם. לצורך האנלוגיה ניקח דוגמה ממכשיר משוכלל אחר – מטוס. כדי לטוס כהלכה, המטוס צריך בין השאר להיות מסוגל להתניע, לצבור תאוצה על הקרקע, להמריא, לנווט את דרכו ולזהות אם יש מכשולים בדרך. כל אחד מן השלבים הללו מצריך מערכת תפקודית מסוימת: כדי לנוע על הקרקע דרושים מנוע ומערכת גלגלים וצירים. לצורך ההמראה נדרשים מבנה אווירודינמי וכנפיים. הניווט יצריך מערכת מכ"ם, וכן הלאה. על־מנת לאפשר תעופה מוצלחת כל המערכות המרכיבות את המטוס צריכות לפעול, כל אחת בתחומה ותוך שיתוף פעולה עם המערכות האחרות.

כמו מטוס, גם תא חי זקוק למרכיבים ולתנאים המתאימים על־מנת שיוכל לתפקד. הוא זקוק ליכולת לחוש דברים מבחוץ, יכולת לנוע כשצריך, יכולת להגן על עצמו מפני חדירת חומרים מזיקים, אך בו־בזמן לאפשר הכנסת חומרים חיוניים כמו חומרי מזון. על־מנת לאפשר את התפקוד של המכשיר המשוכלל הנקרא תא, ישנן מערכות תאיות שתפקידן הוא הוצאה לפועל של הרפרטואר ההתנהגותי של התא. המערכות הללו הן החלבונים.

החלבונים אחראים כמעט לכל התפקודים התאיים. לכל חלבון בתא יש תפקוד ספציפי, חלקם מעורבים בתמיכה מבנית – שומרים שהתא לא יתכווץ או יימעך על־ידי תאים אחרים בסביבתו, אחרים עוזרים בתזוזה – למשל תזוזה של תא זרע אל עבר תא ביצית – ואחרים מאפשרים זיהוי והגנה מפני חיידקים.

בניית מטוס דורשת ספר הוראות מפורט. כל פרק בספר מספק הוראות הרכבה ובנייה של אחת המערכות. ספר ההוראות הביולוגי הוא הדנ"א – ספר ההוראות השלם של התא. הדנ"א עצמו הוא שרשרת ארוכה של אבני בניין כימיות המחוברות אלו לאלו ונקראות בסיסים. קיימים ארבעה סוגי בסיסים בדנ"א, וממש כמו שפה כתובה המורכבת מארבע אותיות, כך גם הסדר שבו הבסיסים הכימיים הללו מאורגנים ומחוברים אחד לשני יוצר מילים ומשפטים שמספקים לתא אינפורמציה. האינפורמציה המתקבלת היא מעין יחידות תורשה הנקראות גנים – מקטעים של דנ"א המכילים הוראות ליצירת תוצר שהוא בדרך כלל חלבון בעל פעילות ספציפית. יש לאדם מעל 20 אלף גנים וכל גן מורכב מכמה אלפי בסיסים כימיים. כולנו מכילים בדיוק את אותם הגנים (שינויים קטנים ברצף האותיות של הגנים בין אנשים שונים, ושמועברים הלאה בתורשה מהורים לילדיהם, הם האחראים לשוני בינינו). בנוסף, ישנם אזורים נרחבים בדנ"א המשתרעים על פני מאות ואלפי בסיסים, שאינם גנים והיות והם לא מקודדים לתוצרים חלבוניים ולא ברור מה תפקידם, הם נקראו בשם "JUNK DNA" (דנ"א זבל).

כאמור, כל תא מכיל את ספר ההוראות הגנטי השלם. לפני כל חלוקת תא ישנו תהליך של שכפול הדנ"א, כך שהתא החדש שנוצר מקבל את ספר ההוראות בשלמותו ומכיל את כל המידע הגנטי הנדרש לפעילותו התקינה.

מי נותן את ההוראות?

הגוף האנושי מורכב מטריליוני תאים השונים במהותם ובתפקודם זה מזה. כל אחד מטריליוני התאים הללו מכיל דנ"א, למעשה בדיוק את אותו רצף של דנ"א. לכל התאים אותו סט של הוראות הפעלה. כיצד יתכן אם כך, שתא מוח ותא עור מכילים בדיוק את אותו ספר הוראות ובכל זאת הם שונים כל־כך זה מזה?

מתברר שלמרות שכל תא מכיל רצף שלם של דנ"א, תאים משתמשים >>

"תגלית מדהימה שנחשפה לאחרונה: תמיד חשבו שברגע שתא עבר התמיינות, קיבל תכונות ספציפיות לרקמה והפך לתא עור למשל, לא ניתן להחזיר את הגלגל אחורנית, לבטל את תהליך ההתמיינות ולהפכו לתא לב. לאחרונה הצליחו לבצע 'תיכנות מחדש' של תאים 'בשלים' כך שעכשיו הם פתוחים לקבלת גורל שונה מזה שהיו מחויבים לו קודם. לתהליך יש פוטנציאל רפואי עצום"

איה בן רון **particle 3 (1999)**

particle 8 (2006) איה בן רון

>>

בגנים באופן סלקטיבי. גנים מסוימים מאפשרים לתאים ליצור חלבונים הדרושים לתפקוד בסיסי, "גנים לתחזוקת משק בית", כמו למשל לחלבון אקטין שתפקידו, בין השאר, לייצב את המבנה התלת־מימדי של התא ולשמור על צורתו. גנים כאלה דרושים בכל סוגי התאים ולפיכך הם מבוטאים בכל הרקמות ובכל התאים כל הזמן. לעומת זאת, ישנם גנים שרוב הזמן אינם פעילים. לדוגמה, גנים הדרושים להפעלה של תהליכים בשלבי ההתפתחות העוברית המוקדמת כבר אינם דרושים ליצור הבוגר, כשהרקמות כבר שלמות ומוכנות לפעולה. גנים אלה מושתקים לחלוטין בתאיו של יצור בוגר. ישנם גנים המכילים הוראות לייצור חלבונים שצריכים להתבטא ולפעול רק ברקמות מסוימות, למשל גנים ליצירת נוירוטרנסמיטורים בתאי מוח או ליצירת אינסולין בתאי לבלב. גנים כאלה צריכים להיות פעילים רק ברקמה הספציפית שבה צריך את הפקטור שאליו הם מקודדים.

באופן כללי ניתן לומר שתא נורמלי מאפשר רק לגנים שהוא זקוק להם להיות מופעלים, ובו־בזמן מעכב את ההפעלה של כל שאר הגנים. ישנה רגולציה תאית. אותו ספר הוראות קיים בכל התאים, אבל לא כל ההוראות נקראות בכל תא. ישנם תאים שמשתמשים בפרקים מסוימים מתוך ספר ההוראות, אבל לא קוראים פרקים אחרים. אם כך, כיצד יודעים התאים אילו גנים לבטא ואילו להשתיק? כיצד יודע התא לאיזה רקמת גוף הוא נועד?

מנגנון ההשתקה וההפעלה – מתילציה

התשובה לשאלה הגדולה הזו טמונה בתחום מדעי שקיים כבר זמן רב אבל צובר תאוצה רבה בשנים האחרונות – אפיגנטיקה (אפי= מעל, אפיגנטיקה= מעל לגנים). מחקר אפיגנטי עוסק בהשפעות על ביטוי והפעלת הגנים, השפעות שנשמרות ומועברות הלאה בתורשה, אבל אינן קשורות בשינוי ברצף הדנ"א עצמו. אין מוטציה או שינוי ברצף הבסיסים של הגן שגורם לביטוי שונה, אבל פקטורים הפועלים על הדנ"א גורמים לפעילותו בדרך אחרת.

אחד המנגנונים האפיגנטיים המרכזיים הוא מתילציה של דנ"א. מתילציית דנ"א היא תגובה כימית שבה מושמת מולקולת מתיל (methyl) על גבי אחד מארבעת הבסיסים של הדנ"א – בסיס שנקרא ציטוזין. כאשר הדנ"א מסומן עם מתיל באזור מסוים, נוצר מצב בו ההוראות באותו אזור **אינן ניתנות לקריאה**. המתילציה מקטינה כביכול את אותיות הדנ"א כך שבלתי אפשרי לקרוא את ההנחיות בספר ההוראות באזור הממותל. במצב כזה הגנים הממותלים בעצם מושתקים ואינם יכולים לבוא לידי ביטוי.

ניתן להתייחס למתילציה כאל סוג של מפסק. כאשר קבוצת המתיל נמצאת, המפסק להפעלת הגן סגור ולפיכך הגן הספציפי לא יבוא לידי ביטוי בתא זה. לעומת זאת, כאשר קבוצת המתיל אינה נמצאת, או מוסרת מהדנ"א, המפסק להפעלת הגן פתוח כך שהגן יכול לבוא לידי ביטוי ולהיות פעיל. מתברר שסימון הדנ"א עם מפסקי המתילציה הוא סימון מאוד יציב. הוא נשאר קבוע עם כל חלוקת תא והוא זה שמקנה לתא את זהותו הספציפית ומאפשר לו תפקוד תקין. תא לב מוגדר ככזה היות ויש לו דגם ספציפי של מפסקי מתילציה על גבי הדנ"א שלו. הוראות מסוימות בספר ההוראות אינן נקראות בתא הזה ועובדה זו היא המאפשרת לו להיות תא לב דווקא, ולא תא עור.

"לעכבר ולאדם יש בדיוק אותו סט של גנים. לכאורה, אנחנו חולקים עם משפחת העכברים בדיוק את אותו ספר הוראות. אם כך, עכברים ובני אדם היו אמורים להיות דומים מאוד. ובכל זאת, כולנו נסכים שקיים הבדל דרמטי בין אדם לעכבר. אם הבדל זה במורכבות בין האדם לעכבר אינו יכול להיות מוסבר רק על בסיס הבדל בין גנים, מהיכן נובע ההבדל?"

התפתחות עוברית

התחלנו את המאמר בהיווצרות הזיגוטה מחיבור תא בודד של ביצית עם תא בודד של זרע. הזרע והביצית, כמו כל תא בגוף הבוגר, מכילים דנ"א שעליו כבר קיימים מפסקים של מתילציה. הזיגוטה, התא הראשוני שבקרוב יהפוך לעובר, משכפל את הוראות הדנ"א ומיד מתחיל להתחלק. מתקבלים תאים חדשים עם דנ"א זהה ועם אותו סידור מפסקים של מתילציה שהיה בתא ממנו הם התחלקו.

מהזיגוטה ומתאי העובר הנוספים אמורים להתפתח כל איברי הגוף וכל סוגי התאים הפעילים. כשאנחנו מתחילים ביצירת עובר חדש אנחנו זקוקים ל־Tabula rasa (לוח חלק), לתאים שעדיין לא הוגדרו ושיהיו מסוגלים להיות בעצם כל סוג תא. כלומר שמפסקי המתילציה שלהם עדיין אינם מכוונים ופעילים. לכן, בתאים עובריים, בשלב מוקדם מאוד של חלוקות התא, יש תהליך של מחיקת המתילציה – כל קבוצות המתיל מוסרות מעל גבי הדנ"א. **בנקודת הזמן הזו כל המפסקים על גבי הדנ"א פתוחים** – לתאים יש פוטנציאל לבטא את כל הגנים שלהם. העובר הראשוני הזה מכיל תאים שיכולים לקרוא את כל ההוראות ולייצר את כל המרכיבים שמפורטים בספר ההוראות של התא. זו דרישה קריטית: התאים הללו יצטרכו לתת מוצא לכל סוגי התאים בגוף. חלקם יצטרכו ליצור תאים שיהוו את מערכת הדם, חלקם ייצרו תאי מעי, אחרים יהפכו להיות תאי כליה וכן הלאה. תאים אלה נקראים embryonic stem cells – **תאי גזע עובריים**.

תאי גזע עובריים הם תאים שעדיין לא התחייבו לגורל ספציפי וכולם בעלי יכולת להיות כל סוג תא, בהינתן ההוראות הנכונות. הם בסיס ראשוני ליצירת עוד מיליוני תאים, כפי שגזע הינו בסיס שעל גביו צומח עץ רחב ענפים ועלים. כשהעובר מגיע לשלב שבו הוא מורכב בסך הכל מכמאה תאים, מתחיל מחדש תהליך המתילציה. בגל הזה של המתילציה כמעט כל הדנ"א הופך להיות ממותל, כלומר, כמעט כל המפסקים על גבי הדנ"א נסגרים ולפיכך לא יכולים להיווצר מהם תוצרים חלבוניים (בשלב זה גנים החשובים לתפקוד השוטף של כל תא, גנים ל"משק בית", נשארים פתוחים על־מנת לאפשר לתא להתקיים). בהמשך, לאחר שרוב הגנום עבר את תהליך המתילציה מחדש, ייפתחו בכל תא ורקמה הוראות ההפעלה

>>

המתאימות לצרכי התא. בתאי העין, למשל, יופעלו הגנים שיוצרים חלבונים לצבע העיניים, אבל לא יהיה צורך שיבוטאו גנים שמקודדים לחלבונים שקשורים לעיכול. לפיכך, המפסק על הגן לצבע העיניים יהיה פתוח (לא ממותל) בתאי העין , אבל יישאר סגור (ממותל) בתאי המעי.

מחקרים בעכברים הראו שמניעת מתילציה פוגעת באופן אנוש בהתפתחות העוברית המוקדמת. זאת אומרת שלמתילציה של גנים יש תפקיד אקטיבי של ממש בתהליך ההתפתחות. ארגון שונה של מפסקי המתילציה על גבי הדנ"א בתהליך ההתפתחות, כלומר השתקת גנים מסוימים ופתיחת גנים אחרים, היא זו שדוחפת את ההתמיינות של אותם תאים ליצירת רקמה מובחנת וספציפית.

מה או מי קובע אילו רצפים של דנ"א יעברו מתילציה? טרם נמצאה לכך תשובה ברורה.

השאלה הפתוחה הזו לגבי הבקרה על פעילות הגנים קשורה לנושא אבולוציוני מרתק. לעכבר ולאדם יש בדיוק אותו סט של גנים. לכאורה, אנחנו חולקים עם משפחת העכברים בדיוק את אותו ספר הוראות. אם כך, עכברים ובני אדם היו אמורים להיות דומים מאוד. ובכל זאת, כולנו נסכים שקיים הבדל דרמטי בין אדם לעכבר. אם הבדל זה במורכבות בין האדם לעכבר אינו יכול להיות מוסבר רק על בסיס הבדל בין גנים, מהיכן נובע ההבדל?

הזכרנו קודם כי מלבד הגנים קיימים אזורים נרחבים בדנ"א שאינם מכילים הוראות ליצירת תוצר חלבוני (או תוצר באופן כללי) ושקיבלו את התואר "JUNK DNA". בתחילת הדרך לא התייחסו ברצינות לרצפים הללו, כיוון שלא היה נראה שהם משמעותיים. אבל יותר ויותר מחקרים מהשנים האחרונות מראים שגם לרצפים הללו יש כפי הנראה תפקיד בתא, ותפקיד זה הינו רגולציה – **בקרה על ביטוי גנים**.

אז מהיכן נובע ההבדל בין אדם לעכבר? הוא נובע מההבדל ביכולת הרגולציה הגנטית שלהם. לאדם יש יכולת ליצור **קומבינציות** מגוונות יותר בין גנים שונים וכך ליצור רשת התנהגותית רחבה בהרבה מזו של עכבר (וכמובן רחבה בהרבה מזו שאפשרית בזבוב או בתולעת, שמכילים מלכתחילה כמות גנים קטנה יותר יחסית ליונקים). הקומבינציות הללו נובעות מאפשרויות רגולציה מורכבות יותר אצל האדם. אפשרויות מגוונות יותר לרגולציה מתאפשרות בשל אזורי בקרה שנמצאים בדיוק באותם רצפים שנחשבו לא חשובים – ב"דנ"א זבל" – שכמותו אצל האדם גדולה מזו שאצל העכבר.

כמה מופלא. ספר ההוראות של התא מכיל לא רק את ההוראות הבסיסיות ליצירת המרכיבים התאיים, אלא גם את ההוראות כיצד להשתמש בהוראות הללו. **היכן ומתי להפעיל ולהשתיק כל פעילות ובאיזו צורה ייווצרו קומבינציות גנטיות שיאפשרו קיום מגוון תכונות גדול.**

תאי גזע – חומר גלם בתולי

כפי שהזכרנו, בשלבים המוקדמים של העובר המתפתח ישנה מחיקה של כל המתילציה על הדנ"א – פתיחת כל המפסקים על גבי הגנים – ותהליך זה קריטי על־מנת לאפשר לתאים החדשים את הפוטנציאל להפוך להיות כל סוג תא וליצירת כל סוגי הרקמות של הגוף הבוגר. תאים אלה הם תאי הגזע העובריים והם מאופיינים בכך שאין להם תכונה ספציפית לרקמה.

באופן היפותטי (והיום כבר הרבה פחות היפותטי ויותר מעשי), על־ידי התערבות אפיגנטית ניתן לגרום לתאים הללו להתמיין לרקמה **שאנו מעוניינים בה**. אם מארגנים מחדש את מפסקי המתילציה על גבי הדנ"א באופן הרצוי לנו, נוכל לקבל את ההתמיינות הרצויה. כלומר, נוכל לייצר את התא או את הרקמה שאנו מחפשים. כאן טמונה ההבטחה הגדולה.

למשל, במחלות נוירודגנרטיביות, כמו אלצהיימר או פרקינסון, בהן תאי המוח מתנוונים ומתים, אם נוכל להשתיל את תאי הגזע העובריים במוחות החולים עם מפסקי המתילציה על גבי הדנ"א במקומות המאפיינים תאי מוח, יתכן והיינו יכולים להחליף את התאים החולים בתאים בריאים וכך לרפא את המחלה. המוני מעבדות בכל העולם חוקרות את האפשרות הזו במטרה לנצל את תכונת "אי המחויבות" של תאי הגזע העובריים על־מנת לטפל בפציעות ובמחלות.

תגלית מדהימה בתחום של תאי הגזע נחשפה לפני כשנה בלבד. עד לא מזמן התפיסה השלטת בתחום היתה שברגע שתא עבר התמיינות, קיבל תכונות ספציפיות לרקמה והפך לתא עור למשל, לא ניתן להחזיר את הגלגל אחורנית ולבטל את תהליך ההתמיינות. כלומר, לא ניתן לקחת תא לבלב ולהפכו חזרה לתא לב. ברגע שנקבעו המפסקים הסופיים על גבי הדנ"א, לא ניתן לחזור אחורה. אבל לאחרונה, כשחוקרים הכניסו פקטורים מסוימים לתאים ממוינים – תאי עור – הם ראו שהתאים הללו מסוגלים להתחלק ולהפוך לתאים מסוג אחר. הם כבר לא מחויבים להיות תאי עור. תהליך זה נקרא reprogramming – תיכנות מחדש. בתהליך זה מתקיים פירמוט של הדיסק הקשיח של התאים ותיכנות מחודש של הוראות ההפעלה כך שעכשיו התאים פתוחים לקבלת גורל שונה מזה שהיו מחויבים לו קודם. לתגלית זו פוטנציאל רפואי עצום. תהליך ה"תיכנות מחדש" עוקף את הצורך בשימוש בתאים ראשוניים של עוברים להפקת תאי גזע היות ובאופן עקרוני, בהינתן התנאים המתאימים, כל תא בוגר ממוין יכול לחזור אחורה ולתפקד כמעין תא גזע.

כמובן שתהליך ה"תיכנות מחדש" הינו מורכב ביותר, אבל מנקודת מבט אפיגנטית, השלב הראשון בתהליך הזה הוא בעצם שינוי במצב המפסקים בתא. גנים שבאופן נורמלי בתאים ממויינים הינם נעולים בשל מתילציה על הדנ"א, מאבדים את המתילציה. המפסקים נפתחים, הגנים מופעלים מחדש ויוצרים תוצרים חלבוניים שמאפשרים לתאים לחזור למצב פחות מחוייב, ובעצם לפתח קריירה חדשה.

המחקר הבסיסי של מתילציית דנ"א המתואר כאן, תרם תרומה דרמטית להבנת משמעות השונות בין תאים. הוא מראה שהתפקוד התאי מבוסס על סט מובנה של הוראות (החומר הגנטי) בשילוב עם מנגנוני בקרה, שמסוגלים לנצל את האינפורמציה הזו בצורה מאורגנת. באופן זה מתאפשר ייצור מגוון רחב של סוגי תאים שונים שחוברים יחד ליצירת אורגניזם שלם. פיענוח תבנית המתילציה של תאי גזע מהווה צעד גדול קדימה, אבל עדיין קיימים אספקטים רבים של המערכת הזו שעוד לא פוענחו. עוד ועוד מחקר בסיסי הוא מה שדרוש לנו על מנת להגיע להבנה מלאה של הפוטנציאל של תאי הגזע.

ברחבי העולם מתקדם מחקר תאי הגזע בקצב מהיר. ועדות אתיות הוקמו ודיונים משפטיים מתנהלים כל הזמן במטרה לברר ולפתור את הבעיות המוסריות העומדות בבסיס השימוש בתאי גזע למחקר וריפוי. מדינות ממנות מכוני מחקר ומקציבות כספים וחברות פרטיות משקיעות הון עתק במחקר ופיתוח. בישראל הכריז הנשיא שמעון פרס כי יקדיש מאמצים נרחבים על־מנת לקדם את מחקר תאי הגזע, תחום שבו הוא רואה הבטחה גדולה להצלת חיים.

עד כמה אנו רחוקים היום מהיכולת לחדש תאים ולייצר רקמות חדשות? האם תאי הגזע הם אכן עתיד ההנדסה הגנטית ועד כמה ניתן להרחיק ולהשתמש בהם למניפולציות ולהתערבות ביולוגית?

המחקר כיום כבר מסוגל לתת תשובות חלקיות לשאלות הללו וטיפולים ראשוניים בכיוון כבר הוכיחו את עצמם. כשהמנגנונים היסודיים של תאי הגזע יפוענחו לעומקם באמצעות מחקר בסיסי, נהיה כולנו – חוקרים ורופאים – בעמדה טובה יותר לתכנן ולבצע מניפולציות יעילות של תאי גזע במטרה להשתמש בהם כדי להיטיב עם המין האנושי. ■

razigreen@gmail.com

להילחם בסרטן

מנגנוני ההשתקה של הגנים הם אחד המפתחות למלחמה בסרטן

ידוע כי הסרטן נגרם בשל גירויים סביבתיים (עישון, תזונה לקויה, חשיפה מוגברת לקרינה וכדומה). כתוצאה מגירויים סביבתיים אלה, מתרחשים שינויים עצומים בהתנהגות התאים. הם מתחילים להתחלק ללא בקרה עד ליצירת גושים של תאים, שהם הגידולים הסרטניים. משהו קרה לתוכנית התאית והתאים איבדו שליטה. משפטים מסוימים בספר ההוראות של התא עברו מחיקה או עיוות כך שיש לתא קושי להוציא לפועל את ההוראות באופן תקין והתא מתחיל להתנהג באופן לא נורמלי.

בעוד שתא סרטני ותא נורמלי כמעט ואינם שונים מבחינה גנטית, כלומר הדנ"א שלהם כמעט זהה, הם מתנהגים באופן שונה לחלוטין. עובדה זו מרמזת על שינוי ברגולציה – בבקרה התאית של התאים הסרטניים. אם זהו אכן המצב, נצפה לראות הבדלים בדגם המתילציה הגנומי בין תא סרטני לתא בריא. ואכן, באנליזה אפיגנטית של תאים סרטניים ניתן לראות שינויים גדולים ומשמעותיים במתילציה של הדנ"א. אזורים רבים בגנום של התאים הסרטניים עוברים הורדה של מתילים, פתיחת מפסקים, בעוד שהרבה גנים שאמורים להיות פעילים עוברים מתילציה, סגירת המפסק, ולכן מושתקים. אם תתרחש למשל סגירת מפסק על גן שאחראי על חלוקת תא תקינה, לא יהיה התא מסוגל להפעיל את הגן והוא יתחיל להתחלק באופן לא נורמלי, ללא הפסקה, עד להיווצרות גידול סרטני.

עד כאן אכן נראה שיש קורלציה בין מתילציה של דנ"א לבין סרטן. אבל האם למתילציה יש תפקיד אקטיבי ביצירת סרטן?

אחת מהמערכות שהשתמשו בהן על־מנת להבין יותר את תפקיד מתילציית הדנ"א בסרטן עשתה שימוש בעכבר שמפתח באופן ספונטני גידולים רבים במעי הגס בשל מוטציה מלידה – פגיעה בגן שנקרא APC (מוטציה באותו גן נמצאת גם בבני אדם החולים בסרטן מעי). במסגרת המחקר עלה רעיון לבדוק מה קורה לגידולים הסרטניים בעכבר כזה, אם לא מאפשרים למתילציה להתרחש. כשטיפלו בעכבר זה, מלידה, בחומר שמעכב את המתילציה ולא מאפשר לסגור מפסקים על גבי הדנ"א, הסתבר שכמות הגידולים ירדה כמעט לאפס. זהו ממצא מדהים. ממצאים דומים התגלו בסוגים נוספים של סרטן ותוצאות אלה מספקות חיזוקים חשובים למעורבות של מתילציית דנ"א ביצירת גידולים סרטניים.

עכבר ה־ APC מעורר מחשבות מעודדות בנושא של פיתוח טיפולים אנטי־סרטניים. עד לאחרונה הטיפול האולטימטיבי כנגד סרטן היה הכימותרפיה. אולם, הבעיה המרכזית בטיפול זה היא פגיעה המתרחשת גם בתאים מתחלקים תקינים, למשל תאי זקיק השערה או תאי מח עצם. בדיוק בנקודה זו נכנסת לתמונה המתילציה. בכל התאים הסרטניים, ללא יוצא מן הכלל, מתרחשת תופעת ההיפר־מתילציה (מתילציה מוגברת וסגירת המפסקים על גבי גנים רבים, באופן לא נורמלי. לכן, שימוש בתרפיה שמתמקדת במתילציה יכול להוות מוקד מצוין לטיפול או למניעת סרטן. רוב התהליכים הנורמליים של המתילציה מתרחשים לפני הלידה, תוך כדי התפתחות העובר. לכן, בשלב בו מתחיל להתפתח סרטן, כבר קיימים בגוף כל המפסקים הנורמליים על גבי הדנ"א. בדיוק בשל כך טיפול שמטרתו לשנות את מצב המפסקים על גבי הדנ"א – שינויי מתילציה בתאים סרטניים ששינו את הדגם הנורמלי של המתילציה – יכול להיות יעיל ביותר וללא תופעות לוואי קשות.

רן אדליסט / צילום: ניר הוד

לא לפחד כלל

ארגונים דתיים טוענים: שוב מנסה האדם לתפוס את מקומו של האל. אנשי מוסר וחברה חוששים מגזענות בנוסח מדעי ויצירת "אדם עליון" חדש. הוויכוח על התערבות באבולוציה של האדם באמצעות הנדסה גנטית ושיבוט הוא מאבק שסופו ידוע מראש, בין טבע האדם והסקרנות המדעית לבין טבע הארגונים השמרניים (דתיים, אתיים, פסיכולוגיים ופוליטיים)

■ איש לא שואל היום ברצינות, האם אנחנו רשאים לשפר את מצב בריאותנו או את איכות מכוניתנו, משום שהתשובה ברורה לכל. אבל כאשר לא מדובר בתרופה יעילה יותר, אלא בשינוי טבעו הפיזי והמנטלי של האדם (ענק שרוצה להיות נמוך יותר, אכזר שרוצה להיות טוב לב, שכחן שרוצה לזכור טוב יותר), התשובה משתנה. או אז נכנסים לתמונה ארגונים דתיים או ממלכתיים, אנשי דת, משפט ומומחי מוסר, שמנסים למנוע, או לפחות להגביל, את השינויים הללו.

מטרת המחקר הגנטי היא, בין היתר, לשפר את מצבו הפיזי והמנטלי של האדם. מטרת ההתארגנויות המתנגדות להנדסה הגנטית, כמו גם לשיבוט, היא להשאיר את האדם במצבו הנוכחי, לא לחרוג מהמסגרות המקובלות והמוכרות. זה טבעו של כל מנגנון: לשמר את המצב הקיים.

חקר ויישום ההנדסה הגנטית מעוגן – פילוסופית ואינהרנטית – בטבע האדם ובתפיסה, שמשמעות החיים היא חיפוש מתמיד אחר הסבר לחידת החיים, תוך ידיעה מוחלטת שהחידה הזאת לעולם לא תפוענח, ושהדרך היחידה להתמודד עם החיים ומשמעותם היא להמשיך לחקור אותם. לחקור פירושו להבין ולהתקדם. להתקדם פירושו להתקיים ברמה אנושית – פיזית, רוחנית וסביבתית – גבוהה יותר.

בדרך לאותה התקדמות, שבאה לביטוי בעיקר במחקר המדעי וביישומו, קורות גם טעויות וטרגדיות. זו איננה סיבה לפסול מראש מחקר ופיתוח כאלה או אחרים. לא של הנדסה גנטית, לא של שיבוט ולא של ניצול אנרגיה מימנית או התערבות בפסיכולוגיה של האדם. בעצם, גם אם יש החלטה או מגמה לעצור מחקר כזה או אחר, היא מתפוגגת במשך הזמן. שום כוח אינו יכול לעמוד לאורך זמן בפני הסקרנות האנושית, כפי שהיא מגולמת בעיקר אצל אנשי המדע לדורותיהם. להבדיל ממצעד האיוולת, שאליו נקלעות מרבית האליטות החברתיות המובילות, בייחוד פוליטיקאים ואנשי דת, המחקר המדעי הצרוף, כולל המאבק הפנימי הקבוע בין פרופ' אינשטיין לד"ר פרנקנשטיין, הוא, בסופו של דבר, מצעד החוכמה האנושית המצטברת. וגם אם פה ושם היא נחפזת מדי, לעולם היא נעה קדימה.

אוברי דה גריי (AUBREY DE GRAY), חוקר באוניברסיטת קיימברידג', מאמין שהביולוגיה המולקולרית עשויה (או עלולה) להביא בסביבות שנת 2100 לתוחלת חיים של אלפי שנים באמצעות תחזוק, תחלופה והנדסה גנטית. גם תחזיות הארכת תוחלת החיים וגם ההתנגדויות שהן מעוררות הן, במחילה, דיבורים מרתקים ושטויות מקסימות, אבל זהו טבעו וטיבו של מחקר מדעי העוסק בעתיד האנושות, ובייחוד מחקר כמו הגנטיקה, שלגביו גבולות הדמיון והאפשרות עדיין לא נקבעו.

בלונדינית חכמה ורזה

את עבודתם של המהנדסים הגנטיים אפשר לתאר באופן פשטני כחיתוך והדבקה של שני סוגי DNA. הפעולה הזו מיועדת לשנות תכונות באמצעות ערבוב ושכפול ה-DNA והרכשת תכונה חדשה, שתעבור בתורשה לתאים שיתחלקו מן הצירוף החדש. מתנגדי ההנדסה הגנטית נוהגים לראות בחלק מהמחקרים העוסקים בשינוי טבעו הפיזי והמנטלי של האדם וביישומו, התערבות בתהליך האבולוציוני בטבע (התנגדות חילונית) או האלוהי (התנגדות דתית).

אנשי המדע שבין המתנגדים להתערבות הגנטית מצביעים על הסכנות שבתהליך. אחד הבולטים שבהם הוא ג'ון פאגאן (John Fagan). השתלת גנים מלאכותית, על-פי פאגאן, עשויה לגרום למוטציות ולשינויים בגנים נורמליים, לגרום למחלות גנטיות שטרם הכרנו ולהביא לשינויים פיזיולוגיים מרחיקי לכת. כמו כן, שינוי גנטי בתאי רבייה ישנה את תהליכי האבולוציה ויוולדו בני אדם עם תכונות נעלמות. מבחינה זו, סבור פאגאן, יש סכנה שאנשים חסרי מצפון יעשו בכלי הזה שימוש מפלצתי. לעומתו, פרופ' רוברט לנגר (Robert S. Langer) מבוסטון, העוסק בטכניקה של החלפת גנים פגומים בתקינים, אינו חושש מהורים שיבקשו ממנו להביא לעולם תינוקות עם תכונות מוזמנות מראש. גם אם אלוהים בעצמו החליט שילד כזה או אחר ייוולד עם גן פגום ויהיה חולה, ולכן אין לנו זכות לרפאו, פרופ' לנגר מוכן לשחק את אלוהים ולהחליף את הגן הפגום כדי להצילו.

המסלול המדעי הוא התקדמות בזיגזג לקראת פריצת דרך, שאינה מתאימה תמיד למציאות החברתית הקיימת. הניסיון מלמד שבסופו של דבר הנורמות מתייצבות, חוקים נחקקים ומוקמים גופי אכיפה, המסדירים את הידע ויישומו לטובת האנושות.

חוקרים מאוניברסיטת מרילנד הנדסו יתושים בעלי פוריות נמוכה, כדי שאלה ישמידו יתושים נושאי מחלות לאחר שישוחררו לטבע. התברר כי יתושי הבר חזקים מיתושי המעבדה, והניסיון (הראשון) להנדס גנטית יתושים לצורכי הכחדת טפילים מזיקים נכשל. גם אם ייוולדו כמה "מפלצות", זה המחיר שהחברה והאדם משלמים כדי לנוע קדימה – כיוון התנועה הטבעי, האינסטינקטיבי, של המין האנושי. בהמשך, אותה התקדמות תכתיב לא רק את השינוי הרצוי בגוף וברוח, אלא גם את הקריטריון המוסרי הנלווה אליה. לדרך מתלווים בהכרח כל אותם חששות מוכרים. "נפילת טכנולוגיה זמינה בידי טרוריסטים ו/או אנשים בלתי אחראים, שעלולים לזהם את העולם", כפי שאומר פילוסוף המדע פיליפ קיצ'נר.

מותר והגיוני לחשוש, אבל בסופו של דבר ההכרעה היא תוצאת מאבק כוחני, שמעורבים בו כל המרכיבים הרגילים: אינטרסים אישיים וכיתתיים, חלקם כלכליים, מול יכולתו של הרוב הדמוקרטי לשפוט נכון מה טוב לאנושות כולה.

סקר מכון "האריס" הראה, כי יותר מ־40% מהאמריקאים מוכנים להשתמש בהנדסה גנטית כדי לשדרג את ילדיהם, נפשית וגופנית. על-פי מה שפורסם, יש ביקוש עצום ל־DNA של תכולי עיניים וזהובי שיער בגובה 1.80 מטר. כבר היום, לפי ג'ואנה פיטמן, מחברת הספר "הבלונדינים" (2005), צובעת כל אישה שלישית באירופה את שערה לגוון בלונד כלשהו, כשהנתונים מורים כי רק אחד מ־20 בוגרים בארצות-הברית ובאירופה הוא אכן בלונדיני אמיתי. במסגרת הכניעה לכל מה שמקודש בתרבותנו, נפתח סניף אחד של בנק זרע בין הרווארד ל-MIT, ואחר ליד סטנפורד. במודעה שפורסמה ב"קרימזון הרווארד" הוצעו 50 אלף דולר תמורת ביצית של בוגרת המוסד. בשיקגו התפרסמה מודעה שמציעה 35 אלף דולר תמורת ביצית, בהדגשה שעל התורמת להיות "בריאה מאוד, חכמה מאוד, נאה מאוד, והחשוב ביותר – מאושרת מאוד". השקפות פוליטיות <<

"לא פעם מהווה הקוד האתי המקובל מכשול בפני התקדמות המחקר המדעי, כאשר זה נאבק על תקציבים ועל הערכה ציבורית. הנימוק הקבוע הוא שהמנטליות האנושית אינה מדביקה את קצב התפתחות המדע. האמת היא שהתפתחות המדע היא זו שגוררת אחריה את 'התקדמות' המנטליות האנושית"

מודל אידיאלי מועדף. "חיילים" ניר הוד, הדפסה ומדיה מעורבת על מראה

>> ליברליות וכישורים ספורטיביים יהוו יתרון. מדובר, כמובן, בטמטום אמריקני צרכני טיפוסי (שממונף על-ידי שיווק גאוני), מכיוון שליברליות או שמרנות, וכנראה גם נטיות רבות אחרות, הן בעיקר עניין של חינוך וסביבה, ואיש אינו יודע כיצד ייראה המודל האנושי המועדף מחר. אבל אם אכן ההתקדמות המתואמת לכאורה בין המדע למוסר אמורה להביא לעולם אנשים טובים יותר וחברה נאורה יותר, אזי לא מדובר על כך שהמדע "קובע" מהו המודל האנושי המועדף בעתיד, אלא שהוא פועל מתוך תפיסה הרואה את טובת המערכת האנושית כולה.

מתנהלת כיום התמודדות סמויה ואכזרית על דמותו של בן האדם שייוצר על-ידי המאגר הגנטי לצורכי שיבוט. דומיננטיות לאורך ההיסטוריה ויתרונות כלכליים מובהקים הובילו לכך, שהמנצח העכשווי הוא טיפוס האדם המערבי הלבן. אין הבדלים של ממש הנובעים מגזע, צבע, דת, צורה או לאום בין בני האדם, אבל כאשר תאגיד בינלאומי כלשהו רוצה למכור בימינו סחורה, הוא בדרך-כלל עושה שימוש במודלים לבנים דומים למדי. הטווח המועדף הוא בין בראד פיט לאנג'לינה ג'ולי (כוכבים אמריקאים הם המפרסמים הגדולים של מוצרים בסין וביפן), והוא נראה מצומצם למדי. ההבדלים הממשיים בין הצבעים והגזעים עתידים להיעלם כאשר השווקים הצהובים והשחורים יתרחבו ויהפכו לקובעי טעם שווי ערך ללבנים, אבל איש אינו יודע באיזה קצב זה יקרה, וכיצד זה ישפיע על יצירת המודל האידיאלי.

תנו למדע לרוץ

בינתיים, מרבית יישומי ההנדסה הגנטית עוסקים במזון, וגם כאן יש לא מעט התנגדויות. כאשר הוכתרו בהצלחה הניסויים בהנדסת מזון – מהחי ומהצומח, התנגדו לכך הארגונים הירוקים, ובראשם גרינפיס. דווקא בארצות-הברית, שבה התערבות במעשי הבריאה היא נושא בעייתי המעורר מחלוקת בפוליטיקה המעשית, קיבלו את השימוש בגידולים מהונדסים בשקט. מן הסתם, בגלל שהגידולים הללו מאפשרים לחקלאים המגדלים תירס וחיטה, להפחית את נזקי המזיקים ולהוזיל את יחידת הזמן והמזון. לא לשווא מוטבע שם האלוהים בדולר האמריקאי.

פרויקט "השבחת גזע" מפורסם מתואר בצורה מפורטת בספרו של דייוויד פלוטץ "בית חרושת לגאונים", שיצא בעברית בהוצאת כתר. בנק זרע של מדענים שחלקם קיבל פרס נובל, טמטם את נשות אמריקה. התוצאה הסופית של הפרויקט היתה כישלון מוחלט.

כאשר מדובר במזון, הוויכוח מתנהל במישור הפונקציונלי. כאשר מדובר בבני אדם, הוויכוח הוא כביכול "מוסרי" ודתי. מרבית המנהיגים הדתיים מתנגדים להתערבות בביצועיו של אלוהים, ויש להם מסייעים רבים מתחומי הפילוסופיה של המוסר, כמו מייקל סנדל (Michael Sandel), פילוסוף מהרווארד, השולל התערבות של הורים בבחירת סוג הילד שייוולד להם מסיבות מוסריות. עניין המוסר חמקמק למדי ונתון לוויכוח, אבל כאשר המדע עוסק בהנדסה גנטית שתשפיע על דמותו העתידית של הגזע האנושי, הוא אינו עושה זאת מסיבות גזעיות או מסחריות, אלא פועל מכורח אותו ציווי כמעט אינסטינקטיבי של המדע, האומר: בכל תנאי קדימה.

לא פעם מהווה הקוד האתי המקובל מכשול בפני התקדמות המחקר המדעי, כאשר זה נאבק על תקציבים ועל הערכה ציבורית. הנימוק הקבוע הוא שהמנטליות האנושית אינה מדביקה את קצב התפתחות המדע. אך האמת היא שהתפתחות המדע היא זו שגוררת אחריה את "התקדמות" המנטליות האנושית.

"להבדיל ממצעד האיוולת, שאליו נקלעות מרבית האליטות החברתיות המובילות, בייחוד פוליטיקאים ואנשי דת, המחקר המדעי הצרוף, כולל המאבק הפנימי הקבוע בין פרופ' אינשטיין לד"ר פרנקנשטיין, הוא, בסופו של דבר, מצעד החוכמה האנושית המצטברת"

ההכרעה בעניין זה חייבת להיות חד־משמעית: תנו למדע שדה חופשי לרוץ בו. כל היתר הם איזונים ובלמים שיסתדרו תוך כדי תנועה.

עד לאותם פריצת דרך וניצחון (ודאי) של המדע, מחקריו ותוצאותיו, קובעת כל חברה ומדינה את משך המחקר ומימוש תוצאותיו. המתנגדות הנחרצות ביותר למחקר ויישום השיבוט הן הדתות למיניהן, באמצעות אלוהים כזה או אחר. בישראל של ראשית שנות האלפיים, כאשר היסודות הנחשלים בחברה קבעו פוליטית את מרבית מהלכי המדינה, נחקק ב־6 בינואר 2004 חוק האוסר על שיבוט. המומחים שהעידו בפני הוועדה הפרלמנטרית שעסקה בעניין, טענו כי החוק ימנע פיתוחים רפואיים שיקלו על סבלם של בני האדם, והמדען הראשי של משרד הבריאות קונן על כך ש"יש ניתוק בין המחוקק לאיש המדע". בסופו של דבר החליטה יושבת ראש הוועדה (אגב, לבדה. כל חברי הוועדה נעדרו), כי החוק יאושר ויועבר לקריאה בכנסת. הפחדים והבערות גברו על זרם החיים.

לפחות כאשר מדובר בהנדסה גנטית ובשיבוט, אנחנו עדים כעת לקרב מאסף, מכיוון שאין לשום התארגנות, דתית או לאומית, משפטית או אתית, אפילו היא מגובה בטקסט מדעי אפוקליפטי, יכולת של ממש למנוע את המחקר. כל הוויכוחים והמאבקים עשויים לעכב או למתן את יישום תוצאות המחקר המדעי, אבל בסופו של דבר ינצחו תמיד "כוחות האדם" – דהיינו, יצר החקירה המדעי האינסופי שלו, כולל ניסוי וטעייה. וכשזה מגיע אל החברה כולה, קול המון כקול שדי מחליט אם מדובר בנזק או בתועלת. ■

כידוע, שחרר הנשיא החדש, ברק אובמה, את התקציבים למחקרים גנטיים בתאי גזע. התקציבים הוקפאו על-ידי הממסד השמרני בראשות הנשיא בוש.

ranedelist@gmail.com

רן אדליסט הוא עיתונאי ואיש תקשורת. ב־2009 יצא ספרו "אנשי הקצה – החיים אונליין".

עילם גרוס

בין פיזיקה למטפיזיקה

ספרו המרתק של הפיזיקאי מיצ'יו קאקו נע בין מדע, ספקולציות של מדע ובדיון. מי שרוצה לשוטט בין יקומים, לשמוע ניגון מיתרים ולחוש באילו שדות מסעירים ודמיוניים צועדת הפיזיקה העדכנית, מוזמן ליהנות ולהתרגש

עולמות מקבילים/ מאת: מיצ'יו קאקו/ תרגום: נעמי כרמל/ הוצאת כתר / 2008

אני צרכן כפייתי של ספרי מדע פופולרי. ברבות השנים פיתחתי לי מנהג משונה לבדוק את האינדקס של כל ספר מדע כזה. אני בוחן בקפידה אילו מדענים נחשבים מופיעים ברשימות ההתייחסות ובהערות השוליים. לסיפור ההיסטוריה של המדע יש חשיבות והשפעה על עבודת המדענים, מעמדם וגם על המדע עצמו.

בעזרת האינדקס של "עולמות מקבילים" (ולא רק בעזרתו) מיצ'יו קאקו יוצר את הרושם שהוא מהאבות המייסדים של תורת המיתרים (הוא מוזכר באינדקס כ־10 פעמים, מספר זהה לזה של אדוארד ויטן, אבי תיאוריית ה־M, שהיא הנושא המדעי המרכזי של ספרו). אין ספק שהוא עושה זאת בהצלחה. עובדה, בביקורת הספר שפורסמה ב־ Harvard Book Review מקבלת המבקרת מרתה פיגלרוביץ' את ההשוואה שעושה קאקו בינו לבין ג'ורג' גאמוב (אחד מאבות הקוסמולוגיה המודרנית, ש"חטא" בפישוט יתר של המדע בספריו הפופולריים) ומציגה אותו כאחד מהוגי תורת המיתרים. זו לא בדיוק תמונת המצב העולה מאינדקסים של ספרים אחרים העוסקים בתחום.

מרגע שהקורא משתכנע בסמכותו המדעית של קאקו, נסללת הדרך לחלק האחרון והעיקרי של ספרו, החלק הספקולטיבי והעתידני, שלא לומר בדיוני – "הבריחה לתוך מרחב־על". הרי ידוע לכל שהשמש תגווע בעוד כמה מיליארדי שנים, ועוד כמה טריליוני שנים כל היקום יתקרר, הגלקסיות יתרחקו זו מזו וישאירו אותנו בודדים ובלי התנאים הנדרשים לקיום. אלא מה, כרגע אנחנו רק ציוויליזציה פרימיטיבית מטיפוס 0.7. כלומר, נצטרך לחכות עוד כמה מיליארדי (או טריליוני, מה זה באמת משנה) שנים עד שנתפתח ונהפוך לציוויליזציה מטיפוס 1, שלא לדבר על ציוויליזציות מתקדמות מטיפוסים 2, 3 או אפילו 4. בעוד זמן קצר, יחסית לטריליוני השנים הללו, נהיה כנראה אלמותיים, נפתח הנעות אנטי־חומר ונלמד להעביר ציוויליזציות ממקום למקום. כמה טריליוני שנים לאחר מכן נפתח חורי תולעת שיאפשרו תקשורת מהירה בין יקומים, ואולי גם נלמד לנצל את האנרגיה האפלה שהתגלתה לא מכבר...

האם יש פגם אתי בכך שמדען חשוב ובר־סמכא כורך במאמר אחד את הידע המדעי הצרוף, המדהים כשלעצמו, עם ספקולציות שיכולות לשמש מיני מיסטיקנים ותמהונים שמסבירים אחר־כך להמונים איך תורת הקוונטים (וגם הפיזיקאים העוסקים בה) תומכת בקיומו של אלוהים? זו שאלה ראויה, ללא ספק, אך לא בכך תעסוק ביקורת זו.

המהפכה הגדולה של הפיזיקה החדשה קשורה למודל המכונה תורת המיתרים. מדובר בהסבר מרתק ומהפכני למבנה היקום, שבו האלמנט הבסיסי של החומר אינו חלקיקים אלא מיתר רוטט; החלקיקים השונים אינם אלא אותו מיתר קטנטן שמתנודד בתדרים שונים. אורכו של המיתר כה קטן, שאם נרצה לגלותו, נצטרך לבנות מאיץ שאף בחלומות איננו יכולים לדמיין כרגע. היקום, לפי תיאוריה זו, הוא כמו סימפוניה אחת גדולה שמופקת ממיתרים רוטטים.

תיאוריית ה־M שבה עוסק קאקו, אינה אלא הרחבה של תורת המיתרים לממברנות. תיאוריות אלו ייתכנו רק אם היקום שבו אנו חיים (שלושה ממדי מרחב וממד אחד של זמן) מוכל ביקום בן עשרה ממדי מרחב וממד אחד של זמן. כן, יקום שבו 11 ממדים. לא מובן? נכון. זהו יקום שאינו נתפס כלל בחושינו. הממדים הנוספים לא נגישים באופן ישיר, אבל בעקיפין הם משפיעים על התצפיות בעולמנו.

התיאוריה הרמונית ויפה, אבל אינה יכולה להציע ניסוי מאושש. מנגֵש ההדרונים הגדול (Long Hadron Collider) שיפעל השנה בג'נבה יוכל אולי למצוא רמזי רמזים לנכונותה, אבל כדי שזה יקרה, צריך לאנוס את התיאוריה לתחום מוגבל מאוד של אפשרויותיה. עם זאת, ייתכן שכמה תצפיות של המנגש יחזקו את המוטיבציה לפיתוח תורת המיתרים ויאפשרו לפיזיקאים לגייס >>

>> כספים לבניית הדור הבא של המאיצים.

למרות שאין כרגע ניסוי שניתן לבצע כדי לאושש את התיאוריה, עשרות פיזיקאים עוסקים בפיתוחה. קשה להם להשליך תיאוריה כה יפה, בעיקר משום שהיא מגשימה את חלומם של הפיזיקאים מאז ניוטון דרך אינשטיין ועד ימינו: היא מאפשרת את איחוד הגרביטציה עם שאר הכוחות בטבע ומהווה בעצם את מה שאחדים מהפיזיקאים מכנים "התיאוריה של הכל" (THEORY OF EVERYTHING).

במקביל למהפכת המיתרים, שהחלה לפני כ־25 שנה, העלה אלן גות את רעיון היקום התופח (אינפלציוני). הקוסמולוגיה התחילה להתערבב עם פיזיקת החלקיקים. וכשפיזיקה מתחומים שונים מתחילה לפתע להתערבב ולהתחבר, ההיסטוריה מלמדת אותנו שמשהו נכון וגדול עומד להתרחש.

קצת לפני כן, בשנות השישים, התגלתה קרינת הרקע הקוסמית, שאינה אלא האקדח המעשן של המפץ הגדול. היום אנחנו יודעים בוודאות שמשהו ייחודי ו"בראשיתי" התרחש לפני כ־14 מיליארד שנה. התצפיות הניסיוניות של השנים האחרונות מעידות, שהיקום שלנו מתפשט באופן מואץ. קאקו מודה שלא ברור עדיין איך בדיוק תיאוריית ה־M מכילה את התפיחה. התיאוריה מספקת, עם זאת, רעיונות ואפשרויות לא פחות אקזוטיים: יקומים, למשל, יכולים להתפצל ולהשריץ יקומים חדשים.

הרב־יקום הזה הוא רעיון פנטסטי. סוף כל סוף אנחנו לא מיוחדים. לא רק ברמה של כדור הארץ או מערכת השמש או הגלקסיה שלנו, אלא גם ברמה של היקום כולו. אפילו רגע בראשית אינו מיוחד יותר, שכן רגעים כאלו התרחשו ומתרחשים מאז ומעולם (אולי על־ידי התנגשות ממברנות...). הציוויליזציה שלנו תוכל אולי להגיע לרמה, שתאפשר לה לייצר יקום חלופי על מנת להציל את עצמה מכיליון.

לא בהיסח הדעת כרכתי יחד רעיונות מדעיים, שרק חלק מבוטל מהם זכה לאישוש מדעי, ושילבתי דברים מוכחים עם רעיונות חדשים שלא נבדקו, ועם תרחישים דמיוניים של יצירת יקום חלופי והימלטות אליו. בכך המשכתי את הדרך, שאת עקבותיה הברורים טבע קאקו בספרו.

לקורא אין סיכוי להבין באמת את המושגים ואת משמעותם. גם לא אם יקרא במילון המונחים הנספח לספר. הוא לא יבין מהי סימטריית־על, מה הקשר בין עולמות מקבילים, קוונטים, גורי יקומים, או איפה בדיוק נמצאת הפיזיקה בניסיונה לכתוב נוסחה אחת כוללת, שממנה יצמח כל היקום. במקום זאת הוא

מאמר של חנוך גוטפרוינד, העוסק ב"תיאוריה של הכל" ובחיפוש הכושל של אלברט אינשטיין אחרי תיאוריה מאחדת, מתפרסם בגיליון זה.

יעמוד משתאה מול כל הרעיונות הפנטסטיים שהפיזיקאים מעלים, ויגיע למסקנה שמדע בדיוני כבר אינו כל־כך בדיוני. זאת במיוחד לנוכח העובדה, שקאקו מגלה בקיאות מדהימה בספרות המדע הבדיוני ומקדיש לפעמים לתיאור ספרות זו יותר ממה שהוא מקדיש, למשל, להסבר של סימטריית־על.

האם באמת תיאוריית ה־M מנבאת את הציוויליזציות האלטרנטיביות או מכונות הזמן שקאקו מספר עליהן בספרו? לא ממש.

האם העובדה שהפיזיקה התיאורטית לא באמת מנבאת את כל הרעיונות שקאקו אוסף וטווה בכשרון רב, משנה משהו למישהו?

קשה לענות על כך. ספרו של קאקו מהנה ביותר. לא כספר מדע פופולרי, שכן בתחום זה, לעניות דעתי, הוא אינו מספק את הסחורה. הוא מהנה ביותר כמעין פסאודו מדע בדיוני. הוא מסקרן, מטלטל ומעורר מחשבה. מצאתי את עצמי חוזר לפרקים שוב ושוב כדי לראות מה מבוסס מדעית ומה לא. לא תמיד, אגב, קיבלתי תשובה.

הקורא שרוצה להבין את תורת המיתרים ו"מארג היקום" לפי הפיזיקה החדשה, ייטיב לעשות אם יקרא את ספרו המופלא של בראיין גרין בשם זה ("מארג היקום", הוצאת מטר). הספר אינו קל לקריאה, אבל הוא עושה את עבודתו נאמנה ומסביר את העקרונות המדעיים של תורת המיתרים, על הפוטנציאל הטמון בה ועל בעיותיה. אחרי "מארג היקום" של גרין יהיה קל לקורא להבין

פרופ' מיצ'יו קאקו

את "העולמות המקבילים" של קאקו ולברור מהמוץ את התבן.

ואם אתם רוצים שאעשה בשבילכם את העבודה ואומר לכם מה יוצא מכל זה, אז בבקשה:

לפי קאקו (שרוב ספרו בנוי מציטוטים של אחרים), ייתכן שבעתיד הרחוק ננטוש את גופי הבשר שלנו וניכנס לגופים רובוטיים. יתרה מזאת, אם לא נלמד לשלוט בחורי תולעת מעבר לרמה הקוונטית (מה שנראה מאוד סביר), נצטרך אולי לצמצם את התודעה שלנו לידע טהור שנזריק כנראה ל"ננו צינורות" של אטומים בודדים, שאותם נוכל לשגר דרך חורי התולעת לעבר יקום חלופי. הללו ילכדו אלקטרונים בצד האחר, ישחזרו את עצמם לאטומים ומולקולות, ומכאן פתוחה הדרך לקיום ביקום חדש...

אגב, הביקורת ב־Harvard Book Review מסתיימת בהערת השוליים: המבקרת מרתה פיגלרוביץ' קיימת גם ביקום אלטרנטיבי, שבו לא כתבה מאמר ביקורת זה. ■

eilamgross@gmail.com

עילם גרוס הוא פרופסור לפיזיקת חלקיקים במכון ויצמן למדע וחבר בוועדה המייעצת של "אודיסאה"

אודיסאה

| מסע בין רעיונות |

מלאו פרטים – פקססו אלינו – ואתם מנויים

שובר לרכישת מנוי:

אבקש לרכוש מנוי שנתי במחיר 200 ₪ (כולל מע"מ ודמי משלוח בארץ):

שם מנוי: ______

מספר טלפון: ______ טלפון נייד: ______

רחוב: ______ מספר בית: ______ מספר דירה: ______

ישוב: ______ מיקוד: ______

דואר אלקטרוני: ______

מס' כרטיס אשראי: ____|____|____|____

תוקף: ____ / ____

מס' ת.ז: ______

שם וכתובת למשלוח חשבונית: ______

הערות: ______

מנוי החל מגיליון מספר: 1 / 2 / 3 / 4 (נא הקף את הבחירה בעיגול)

שם המזמין: ______ חתימת המזמין: ______

את השובר שלחו לפקס מס': 03-9158847 או בדואר לכתובת:
"אודיסאה- מסע בין רעיונות" – ת"ד 15055, רחובות 76150
ניתן לרכוש מנוי גם באתר האינטרנט שלנו: www.odyssey.org.il

לבירורים ניתן לפנות במייל לכתובת: iris-ha@odyssey.org.il

שירות לקוחות: 03-9411621, 052-9993111

אודיסאה

| מסע בין רעיונות |

את השובר שלחו לפקס מס': 03-9158847